



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN 1.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

***“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO TOLERANTE A
PATRONES DE COMPORTAMIENTOS GENERADORES DE
CORROSION EN UN SISTEMA DE TRANSPORTE POR OLEODUCTOS”***

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA**

PRESENTA:

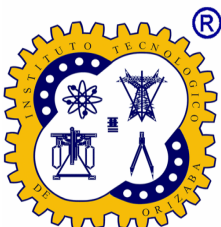
MII. Jonathan Josué Cid Galiot

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Alberto A. Aguilar Lasserre

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. José Pastor Rodríguez Jarquín



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO

SEPTIEMBRE 2022



Orizaba, Veracruz, 01/09/2022
Dependencia: División de Estudios de
Posgrado e Investigación
Asunto: Autorización de Impresión
OPCION: I

C. JONATHÁN JOSUÉ CID GALIOT
Candidato a Grado de Doctor en:
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
P R E S E N T E.-

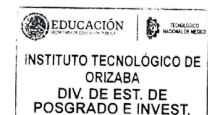
De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO TOLERANTE A PATRONES DE COMPORTAMIENTOS GENERADORES DE CORROSION EN UN SISTEMA DE TRANSPORTE POR OLEODUCTOS.”

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

DR. MARIO LEONCIO ARRIOLA RODRÍGUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



OG-13-F06





Orizaba, Veracruz, **Agosto 24, de 2022.**
Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. MARIO LEONCIO ARRIOJA RODRÍGUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.
JONATHAN JOSUÉ CID GALIOT

La cual lleva el título de:

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO TOLERANTE A PATRONES DE
COMPORTAMIENTOS GENERADORES DE CORROSION EN UN SISTEMA DE TRANSPORTE POR
OLEODUCTOS.”**

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. ALBERTO ALFONSO AGUILAR
LASSERRE

FIRMA

SECRETARIO: DR. JOSÉ PASTOR RODRÍGUEZ JARQUIN

FIRMA

VOCAL: DR. ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN

FIRMA

VOCAL: DR. ULISES JUÁREZ MARTÍNEZ

FIRMA

VOCAL: DR. RUBÉN POSADA GÓMEZ

FIRMA

VOCAL SUP.: DR. DANIEL VILLANUEVA VÁSQUEZ

FIRMA

FTI-TI-013



INDICE GENERAL

ABSTRACT

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. GENERALIDADES.....	2
2.1 Planteamiento del problema.....	2
2.2 Objetivos.....	5
2.2.1 Objetivo general.....	5
2.2.2 Objetivos específicos.....	5
2.3 Hipótesis.....	6
2.4 Justificación.....	7
2.5 Estructura Metodológica.....	9
3. MARCO TEORICO.....	12
3.1 La industria Petrolera en México.....	12
3.2 Control tolerante a fallas.....	15
3.3 Simulación Monte Carlo.....	17
3.3.1. Algoritmo de Simulación Monte Carlo.....	18
3.3.2 Análisis de Riesgo con Simulación Monte Carlo.....	19
3.4 Inteligencia Artificial.....	20
3.4.1. Red Neuronal Artificial (RNA).....	20
3.4.1.1 Elementos que componen una red neural artificial.....	21
3.4.1.2 ¿Para qué sirven las redes neuronales?.....	21
3.4.1.3. Funcionamiento de una RNA.....	22
3.4.1.4. Ventajas de una RNA.....	22
3.4.2 Control adaptativo (Neuro- Difuso).....	23
3.4.3 Algoritmos Genéticos.....	25
3.4.3.1 Operadores de un GA.....	27
3.4.3.2 Ventajas y desventajas de un algoritmo genético.....	28
4. METODOLOGIA: DESARROLLO Y RESULTADOS.....	30
4.1 Introducción.....	32
4.2 Etapa 1: Revisión del estado del arte.....	33
4.2.1 Metodología: Revisión Literaria Sistemática (RLS).....	33

4.2.2 Selección de los estudios y evaluación de la calidad.....	34
4.2.3 Análisis y síntesis.....	35
4.2.4 Discusión y conclusiones de la Revisión Literaria Sistemática (RLS).....	38
4.3 Etapa 2: Definición de los objetivos y alcances.....	40
4.4 Etapa 3: Identificación de fallas, PCGC, perturbaciones e incertidumbres asociadas al funcionamiento del STO.....	43
4.5 Etapa 4: Desarrollo del SMT a PCGC.....	44
4.5.1 Análisis del sistema.....	46
4.5.1.1 Sub sistema 1: Programa & Instrumentación operativa del STO (SCADA).....	47
4.5.1.2 Sub sistema 2: Sistema de Protección Anticorrosiva (SPA).....	50
4.5.1.3 Sub sistema 3: Integridad Mecánica (Ultrasonic Intelligent pigging Inspection)....	54
4.5.1.4 Sub sistema 4: Análisis Metalográfico.....	58
4.5.1.4.1 Extracción y preparación de la muestra metalográfica.....	59
4.5.1.4.2 Ensayo de tracción.....	63
4.5.1.4.3 Sonda 1.....	64
4.5.1.4.4 Sonda 2.....	64
4.5.1.4.5 Caracterización mecánica - Ensayos de dureza método Rockwell y Vicker's....	66
4.5.1.4.6 Análisis de la corrosión por equipo de ultrasonido y microgeometría del material.....	67
4.5.2 Diseño del sistema de Diagnostico.....	68
4.5.3 Tolerancia a Fallos.....	72
4.5.3.1 Diseño de los mecanismos de tolerancia del SMT a PCGC (Sub sistema 1).....	72
4.5.3.2 Diseño de los mecanismos de tolerancia del SMT a PCGC (Sub sistema 2).....	81
4.5.3.3 Diseño de los mecanismos de tolerancia del SMT a PCGC (Sub sistema 3).....	86
4.5.3.4 Diseño de los mecanismos de tolerancia del SMT a PCGC (Sub sistema 4).....	92
4.5.3.5 Discusión, Resultados y Conclusiones de los mecanismos de tolerancia.....	96
4.5.4 Supervisión y aplicación.....	99
4.5.4.1 Interconexión de los Sub sistemas con el Control principal del SMT a PCGC.....	102
4.5.4.2 Controlador Neuro-Difuso (ANFIS) del SMT a PCGC.....	102
4.6 Etapa 5: Analizar posibles casos de reconfiguración.....	114

4.6.1 Aplicación de algoritmos genéticos para minimizar la gestión de fallas únicas, así como casos de reconfigurabilidad del SMT A PCGC.....	119
4.7 Etapa 6: Sistema de Análisis Estructural del Sistema de Transporte por Oleoducto (SAE –STO).....	124
4.7.1 Sistema de soporte a la decisión para determinar el efecto del uso de mezclas de petróleo crudo en la corrosión de los aceros al carbono en la industria mexicana del petróleo y el gas.....	124
4.7.1.1 Módulo 1. Análisis de la integridad mecánica del STO mediante un SED.....	126
4.7.1.2 Módulo 2. RNA para estimación del porcentaje de corrosión producido por un barril de petróleo crudo (PCPB).....	130
4.7.1.3 Módulo 3. Análisis operativo y económico con SMC.....	135
4.7.1.4 Discusión del Sistema de soporte a la decisión para determinar el efecto del uso de mezclas de petróleo crudo en la corrosión de los aceros al carbono en la industria mexicana del petróleo y el gas.....	140
4.7.2 Sistema de soporte a la decisión para aumentar la confiabilidad operativa del sistema de distribución de hidrocarburos de la industria mexicana de petróleo y gas.....	143
4.7.2.1 Módulo 1. Análisis operacional del STO.....	144
4.7.2.2 Módulo 2. Capitalización del conocimiento con el SED.	146
4.7.2.3 Módulo 3. Interpretación de datos históricos empleando una RNA.....	150
4.7.2.4 Módulo 4. Análisis comparativo de los sistemas inteligentes empleados.....	152
4.7.2.5 Discusión del Sistema de soporte a la decisión para aumentar la confiabilidad operativa del sistema de distribución de hidrocarburos de la industria mexicana de petróleo gas.....	153
4.8 Etapa 7: Evaluación de impactos, resultados e identificación de actividades o procesos más significativos.....	155
4.9 Etapa 8: Discusión y conclusiones del proyecto de investigación.....	156
RECOMENDACIONES.....	159
CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO.....	160
Propósito.....	160
Diseño / metodología / enfoque.....	160
Hallazgos.....	160
Implicaciones prácticas.....	161

Originalidad / Valor.....	161
PRODUCTOS GENERADOS.....	163
BIBLIOGRAFIA.....	164

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Ishikawa propuesto para este estudio.....	3
Figura 2. Diseño metodológico propuesto para la investigación.....	9
Figura 3. Diseño metodológico propuesto para desarrollar SMT a PCGC.....	10
Figura 4. Precio promedio anual del petróleo crudo de la OPEP de 2013 a 2018.....	13
Figura 5. Métodos de control tolerante a fallas.....	16
Figura 6. Esquema de control tolerante a fallas.....	17
Figura 7. Metodología del método Monte Carlo.....	18
Figura 8. Algoritmo de método Monte Carlo.....	18
Figura 9. Elementos que componen la RNA.....	21
Figura 10. Análisis de los trabajos de estudio en SLT (PI's).....	35
Figura 11. Celda de corrosión (Corrosión Galvánica) & Índices de corrosión relativos en mili-pulgadas/año (mpy) del acero al carbono.....	36
Figura 12. Modelos inteligentes para predicción de corrosión en STD.....	37
Figura 13. Regiones de comportamiento del CTF.....	38
Figura 14. Interacción del SMT a PCGC con el STO.....	44
Figura 15. Regiones de comportamiento & Metodología del CTF.....	45
Figura 16. Estructura grafica del SMT a PCGC.....	46
Figura 17. Perfil topográfico e hidráulico del centro de distribución.....	49
Figura 18. Funcionamiento operacional del STO.....	49
Figura 19. Reporte de robo de hidrocarburo de enero del 2018 a septiembre del 2019.....	50
Figura 20. Estudios de Ph y Resistividad del tramo no.9	53
Figura 21. Estudios de PH, Resistividad y CIPS.....	54
Figura 22. Gráfico de sedimentación, influencias & valores atípicos.....	57

Figura 23. Gráfico de dispersión de FER vs EPI, PPM del EPM, LIP & ANPI.....	58
Figura 24. Metodología de extracción y preparación de la muestra metalográfica.....	60
Figura 25. Proceso micrográfico.....	62
Figura 26. Composición química del acero por zonas.....	63
Figura 27. Gráficos referentes al ensayo de tracción.....	65
Figura 28. Ensayos de dureza Rockwell y Vicker's.....	67
Figura 29. Análisis de corrosión por ultrasonido y Rugosidad.....	68
Figura 30. Esquema de diagnóstico de fallas para un oleoducto y Matriz de firmas de fallas.....	71
Figura 31. Arquitectura del Modelo Difuso de tipo Mamdani para el Sub sistema 1.....	73
Figura 32. Varianza entre las Variables de Salida Normalizadas de los escenarios del Sub Sistema 1.....	77
Figura 33. Análisis de regresión múltiple del Sub sistema 1.....	78
Figura 34. Diagramas de superficie de respuesta para el Sub sistema 1.....	80
Figura 35. Estructura del Sub sistema 1 en Simulink.....	81
Figura 36. Arquitectura del Modelo Difuso de tipo Mamdani para Sub sistema 2.....	83
Figura 37. Diagramas de superficie de respuesta para el Sub sistema 2.....	85
Figura 38. Estructura del Sub sistema 2 en Simulink.....	86
Figura 39. Arquitectura del Modelo Difuso de tipo Mamdani para Sub sistema 3.....	88
Figura 40. Diagramas de superficie de respuesta para el Sub sistema 3.....	91
Figura 41. Estructura del Sub sistema 3 en Simulink.....	91
Figura 42. Arquitectura del Modelo Difuso de tipo Mamdani para Sub sistema 4.....	93
Figura 43. Diagramas de superficie de respuesta para el Sub sistema 4.....	95
Figura 44. Estructura del Sub sistema 4 en Simulink.....	96
Figura 45. Gráfico de los valores atípicos de los escenarios de falla de los sub sistemas 1 al 4.....	97
Figura 46. Análisis de regresión múltiple de los sub sistemas 1 al 4.....	98
Figura 47. Análisis de regresión múltiple de los sub sistemas 1 al 4.....	98
Figura 48. Interconexión del controlador ANFIS y los Sub sistemas.....	102
Figura 49. Modelo Difuso Sugeno.....	103
Figura 50. Diagramas de superficie del ANFIS.....	110

Figura 51. Comportamiento de las variables de falla del ANFIS.....	111
Figura 52. Arquitectura de la RNA del ANFIS.....	111
Figura 53. Entrenamiento del Sistema Neuro-difuso.....	112
Figura 54. Comportamiento del sistema real & virtual.....	113
Figura 55. Asociación de Variables de Fallas Vs Salidas.....	113
Figura 56. Matriz de firma de fallas únicas para los Sub sistema 1 y 3.....	114
Figura 57. Algoritmo aplicado para la optimización de los sub sistemas 1 y 3.....	115
Figura 58. Metodología propuesta para el desarrollo del SSD.....	125
Figura 59. Resultados de la prueba no. 1.....	128
Figura 60. Coeficiente de determinación del SED.....	129
Figura 61. Arquitectura de la RNA.....	132
Figura 62. Resultados de las pruebas de la RNA.....	133
Figura 63. Diagrama de tornado del impacto de las variables de entrada contra el PCPB.....	134
Figura 64. Metodología utilizada para la SMC.....	135
Figura 65. Metodología para el desarrollo del SSD.....	144
Figura 66. Sistema de confiabilidad operativa de Pemex Logística.....	145
Figura 67. Capitalización del conocimiento del personal Pemex Logística.....	146
Figura 68. Arquitectura del SED.....	148
Figura 69. Gráficos de Superficie de respuesta del SED.....	149
Figura 70. Arquitectura de la RNA.....	150
Figura 71. Pruebas y validación de la RNA.....	151
Figura 72. Fracción de resultados de las pruebas en las salidas de la RNA vs SED.....	152

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Orden de importancia de los medios de transporte (1= Mas importante).....	13
Tabla 2. Diferencias y Similitudes entre las RNA y LD.....	24
Tabla 3. Volumen y exportación de transporte por oleoducto de 2015 a 2019.	31
Tabla 4. Preguntas de investigación.....	33
Tabla 5. Preguntas de evaluación de la calidad.....	34
Tabla 6. Propiedades Físico-Químicas de los Crudos Mexicanos.....	47
Tabla 7. Programa operativo establecido.....	48
Tabla 8. Grado de agresividad del suelo en función de la resistividad.....	52
Tabla 9. ACP Tramo 9, E-5 a E-6.....	59
Tabla 10. Componentes químicos con referencia de pesos y átomos.	62
Tabla 11. Características de las sondas.....	64
Tabla 12. Resultados finales del ensayo de tracción.....	65
Tabla 13. Escenarios de falla del STO.....	69
Tabla 14. Variables de entrada y escenarios del Sub sistema 1.....	72
Tabla 15-A. Etiquetas lingüísticas del Sub sistema 1.....	74
Tabla 15-B. Etiquetas lingüísticas del Sub sistema 1.....	75
Tabla 15-C. Etiquetas lingüísticas del Sub sistema 1.....	76
Tabla 16. Muestra informativa del Sub sistema 1.....	77
Tabla 17. Variables de entrada y escenarios del Sub sistema 2.....	82
Tabla 18. Etiquetas lingüísticas del Sub sistema 2.....	84
Tabla 19. Variables de entrada y escenarios del Sub sistema 3.....	87
Tabla 20. Etiquetas lingüísticas del Sub sistema 3.....	89
Tabla 21. Variables de entrada y escenarios del Sub sistema.....	92
Tabla 22. Etiquetas lingüísticas del Sub sistema 4.....	94
Tabla 23 A. Etiquetas lingüísticas de las variables inciertas de los Sub sistemas.....	99
Tabla 23 B. Etiquetas lingüísticas de las variables inciertas de los Sub sistemas.....	100
Tabla 23 C. Etiquetas lingüísticas de las variables inciertas de los Sub sistemas.....	101
Tabla 24-A. Etiquetas lingüísticas de las variables del ANFIS.....	103
Tabla 24-B. Etiquetas lingüísticas de las variables del ANFIS.....	104

Tabla 24-C. Etiquetas lingüísticas de las variables del ANFIS.....	105
Tabla 24-D. Etiquetas lingüísticas de las variables del ANFIS.....	106
Tabla 24-E. Etiquetas lingüísticas de las variables del ANFIS.....	107
Tabla 24-F. Etiquetas lingüísticas de las variables del ANFIS.....	108
Tabla 24-G. Etiquetas lingüísticas de las variables del ANFIS.....	109
Tabla 25-A. Planteamiento del Algoritmo para el Sub sistema 1.....	116
Tabla 25-B. Planteamiento del Algoritmo para el Sub sistema 3.....	117
Tabla 26-A. Evaluación de la población para el sub sistema 1.....	117
Tabla 26-B. Evaluación de la población para el sub sistema 3.....	118
Tabla 27. Interface de Evolver para el sub sistema 1.....	119
Tabla 28. Resultados de Evolver para el sub sistema 1.....	120
Tabla 29. Simulación de Evolver para el sub sistema 1.....	120
Tabla 30. Interface de Evolver para el sub sistema 3.....	121
Tabla 31. Resultados de Evolver para el sub sistema 1.....	121
Tabla 32. Simulación de Evolver para el sub sistema 1.....	122
Tabla 33. Programación y resultados del Algoritmo genético en Matlab.....	123
Tabla 34. Parámetros del SED.....	127
Tabla 35. Fracción de valores de probabilidad de la distribución triangular para los nueve factores de riesgo.....	128
Tabla 36. Resultados del SED.....	129
Tabla 37. Fracción de datos del cálculo de integrados y pérdidas de marzo del 2017, con base al programa de transporte diario estimado.....	133
Tabla 38. Fracción de valores de probabilidad de la distribución triangular para los nueve factores de riesgo.....	136
Tabla 39. Fracción de datos del cálculo de integrados y pérdidas de marzo del 2017, con base al programa de transporte diario estimado.....	137
Tabla 40. Ganancia total del mes de enero con base al valor de ingreso por reciclaje del mes de diciembre.....	138
Tabla 41. Gráficos de densidad y correlación de la ganancia de enero, febrero y marzo.....	139
Tabla 42. Parámetros del SED.....	148
Tabla 43-A. Parámetros planteados en la investigación.....	155

Tabla 43-B. Parámetros planteados en la investigación.....	156
---	------------

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-6. FER.....	55
Ecuación 7. Matriz de fallos.....	70
Ecuación 8. Minimizar & Maximizar.....	119
Ecuación 9. UVPC.....	135

NOMENCLATURA

<i>Abreviatura</i>	<i>Significado</i>
A	Área de indicación de pérdida de metal
A _o	Área de sección transversal defectuosa con la misma longitud igual a la longitud del metal indicación de pérdida
ARRs	Relaciones de redundancia
ACO	Optimización por Colonia de Hormigas
ACP	Análisis de Componentes Principales
AG	Algoritmo Genético
ANN	Artificial neural network
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
API	American Petroleum Institute
ANPI	Identifica el ancho de la pared interna de la tubería
BN	Bayesian network
BDT	Barriles Diarios Transportados
CPS-TB	Capacidad de Presión de Succión de una Turbo Bomba
CPD-TB	Capacidad de Presión de Descarga de una Turbo Bomba
C	Corrosión
CO ₂	Corrosión Dulce
Cu/CuSO ₄	Cobre/Sulfato
CDM	Centro de distribución Mendoza
COVID-19	Coronavirus
CTF	Control Tolerante a Fallas
CIPS	Close Interval Potential Survey
CM	Centímetro
D	Diámetro de longitud nominal externa
d	Profundidad de pérdida de metal
DCVG	Gradiente de voltaje en corriente directa
DDV	Derecho De Vía
EA	Algoritmos Evolutivos
E	Estación de Bombeo

EIM	Estudio de Integridad Mecánica
EPI	Espesor de la Pared Interna de la tubería.
Fd	Factor de diseño
FTCS	Fault-Tolerant Control Systems
FL	Fuzzy logic
FER	Factor Estimado de Reparación
GC	Corrosión Galvánica
GPS	Sistemas de Geo Localización
H ₂ S	Corrosión acida
HP	Potencia Instalada
HV	Dureza Vicker's
HB	Dureza Brinell
HR	Dureza Rockwell
IA	Inteligencia artificial
KM	Kilometro
KN	Kilo Néwtones
L	Longitud de pérdida de metal medida
LD	Lógica Difusa
LMI	Desigualdades Matriciales Lineales
LIP	Analiza los defectos en la pared interna de la tubería
M	Factor de folios
MAOP	Máxima presión segura para una tubería con indicaciones de pérdida de metal
Mpa	Mega pascales
Mbd	Miles de barriles diarios
MOGA	Algoritmo Genético Multiobjetivo
MI	Mechanical Integrity
MIC	Corrosión microbiológica
mV	miliVoltios
mm	Miímetros
ND	Neuro - Difuso

NACE	Organización profesional sin fines de lucro para la industria de control de corrosión.
O ₂	Corrosión con oxígeno
OPEP	Organización de Países Exportadores de Petróleo
ORS	Sistema de confiabilidad operativa
PARED	Identifica si la afectación de la tubería es interna o externa
PCGC	Patrones de Comportamiento Generacionales de Corrosión
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PEC	Pregunta de Evaluación de la Calidad
PSO	Optimización de Enjambre de Partículas
PI	Preguntas de Investigación
Psi	Libra de fuerza por pulgada cuadrada
PTS	Pipeline Transport System in oil and gas industry
POE	Programa Operativo Establecido
pH	Potencial de Hidrogeno
PCM	Pipeline Current Mapper
PPM del EPI	Porcentaje del defecto asociado con adelgazamiento de la pared interna de una tubería
P safe	Máxima Presión segura de Operación
QS5	Equipo de medición de corrosión por ultrasonido
RPC	Rectificador de Potencia de corriente
RNA	Red Neuronal Artificial
RLS	Revisión de Literatura Sistemática
RPM	Revoluciones Por Minuto
SAE	Sistema de Análisis Estructural
SA	Recocido Simulado
SE	Sistemas Expertos
SCADA	Supervisión, Control y Adquisición de Datos
SCOPUS	Base de datos bibliográfica de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas
SED	Sistema Experto Difuso

STO	Sistema de Transporte por Oleoductos (Solo transporta petróleo crudo)
STD	Sistema de Transporte por Ductos
SSD	Sistema de Soporte a la Decisión
SMT	Sistema de Monitoreo Tolerante
SMC	Simulación Monte Carlo
SPA	Sistema de Protección Anticorrosiva
SYMS	Límite elástico mínimo especificado del material de la tubería
t	Espesor nominal de la pared
UTS	Kilogramos
μm	Micro Pulgadas

RESUMEN

La industria del petróleo y gas a nivel mundial está experimentando problemas de vandalismo y deterioro mecánico debido a la corrosión en sus diversos sistemas de transporte por ductos, una caída en el precio de los hidrocarburos debido al COVID-19, limita los procesos de mantenimiento. Este proyecto de investigación surge de una revisión sistemática de la literatura generando un aporte original al conocimiento y manejo de un sistema de transporte por ductos (STO), con un alto impacto inmediato que ayudaría a diagnosticar, identificar, aislar y reconstruir diversos escenarios de falla, generados por la pérdida de propiedades de la tubería (Corrosión) a través del desarrollo de una metodología de diseño integral de un sistema de monitoreo tolerante a patrones de comportamiento generacionales de corrosión (SMT a PCGC), mediante el control tolerante a fallas (FTCS). El trabajo presenta un análisis del sistema de la estructura y componentes del control por subsistemas, soportado con procedimientos de protección catódica, pH de suelos, instrumentación, caracterización mecánica, inspección inteligente por ultrasonido, cromatografía, espectroscopia, metalografía, así como ensayos de tracción, de un STO, deteriorado y vandalizado en México. Además, se presentan los escenarios de falla, mecanismos de diagnóstico y tolerancia, control adaptativo inteligente, supervisión y aplicación, lo que permite monitorear los escenarios de falla en condiciones controladas y abiertas, con el objetivo de minimizar diferencias entre entradas y salidas estimadas por el sistema predictor y real.

Keywords: Sistemas de control tolerante a fallas (FTCS), Corrosión (C), Sistema de transporte por oleoductos (STO), Inteligencia artificial (IA), Integridad mecánica (MI).

ABSTRACT

The oil and gas industry worldwide is experiencing problems of vandalism and mechanical deterioration due to corrosion in its various pipeline transportation systems, a drop in the price of hydrocarbons due to COVID-19, limits maintenance processes. This research project arises from a systematic review of the literature generating an original contribution to the knowledge and management of a pipeline transport system (PTS), with a high immediate impact that would help diagnose, identify, isolate and reconstruct various failure scenarios. , generated by the loss of pipeline properties (Corrosion) through the development of a comprehensive design methodology for a monitoring system tolerant to generational behavior patterns of corrosion (SMT to PCGC), through fault tolerant control (FTCS). The work presents an analysis of the structure system and control components by subsystems, supported by cathodic protection procedures, soil pH, instrumentation, mechanical characterization, intelligent inspection by ultrasound, chromatography, spectroscopy, metallography, as well as tensile tests, of a PTS, deteriorated and vandalized in Mexico. In addition, the failure scenarios, diagnosis and tolerance mechanisms, intelligent adaptive control, supervision and application are presented, which allows monitoring the failure scenarios in controlled and open conditions, with the aim of minimizing differences between inputs and outputs estimated by the user. predictive and real system.

Keywords: Fault Tolerant Control Systems (FTCS), Corrosion (C), Pipeline Transportation System (PTS), Artificial Intelligence (AI), Mechanical Integrity (MI).

1. INTRODUCCIÓN

La industria petrolera es una actividad económica importante para el mundo porque esta industria genera numerosos empleos, tanto directa como indirectamente, desde su extracción hasta su comercialización final. Los precios del petróleo crudo colapsaron en marzo del 2020, registrando su mayor caída mensual desde la crisis financiera mundial en 2008. Las ramificaciones de la pandemia de COVID-19 fueron la principal fuerza impulsora, lo que resultó en un sin precedentes choque mundial de la demanda de petróleo y ventas masivas en los mercados mundiales de petróleo, en medio de un importante superávit de crudo. El valor de la cesta de referencia de la OPEP, bajó \$ 21.61, o 38.9%, para situarse en \$ 33.92 / barril, el valor mensual más bajo desde septiembre del 2003 (OPEC, 2020).

La industria del petróleo y gas en México, presenta deficiencias económicas por costos de exploración, producción, transporte y venta de hidrocarburos ante la variabilidad de precios internacionales en los últimos años, alcanzando costos históricos de venta \$ 10.61/barril en abril del 2020 (banxico, 2020). Las condiciones de la empresa, limitan en la actualidad procedimientos de mantenimiento a instalaciones, algunas con más de 60 años de servicio, como los sistemas de transporte por oleoductos (STO), con afectaciones críticas de integridad mecánica por corrosión y perforación del ducto. Este último reportando 10,200 tomas clandestinas de enero a septiembre del 2019, con una recurrencia cada 38 minutos y 39 segundos a nivel nacional a sus redes de ductos (Petroleos Mexicanos, 2020).

Los STO, son un medio de transporte que se puede utilizar por vía marítima, terrestre o aérea de acuerdo con las necesidades geográficas de la empresa, que a menudo se vuelve inestable bajo ciertas condiciones de trabajo, tales como: variaciones operativas de succión y descarga de un producto, efectos de golpe de ariete así como cavitación (Ghidaoui, Zhao, McInnis, & Axworthy, 2005), perturbaciones relacionadas con la integridad mecánica, en el sistema debido a efectos de corrosión interna o externa, que generalmente se fortalece en varios escenarios y a veces es inmune a la aparición de inhibidores de corrosión (G. & F., 2014).

Si las perturbaciones no se controlan a tiempo, pueden causar un mal funcionamiento del sistema, lo que lleva al STO a la inestabilidad, lo que genera altos riesgos a todo ser vivo a su alrededor ([Infobae, 2018](#); [Leifer et al., 2012](#); [Petroleos Mexicanos, 2020](#)). Este hecho, junto con la necesidad imperante de satisfacer las demandas operativas de las empresas, muestra la importancia de monitorear y controlar las variables relevantes del proceso, promoviendo la necesidad de nuevas tecnologías, capaces de adaptarse al comportamiento dinámico del sistema para reconfigurar su operación.

2. GENERALIDADES

2.1 Planteamiento del problema

Pemex Logística es responsable de la planificación y transporte de mezclas de hidrocarburos mexicanas, de acuerdo con su programa operativo, cuyo objetivo es transportar 460.000 barriles por día, de los cuales la empresa solo transporta 75.000 barriles por día, lo que equivale al 16.3% del programa diario, generando altas pérdidas económicas aunado al exponencial incremento de los mantenimientos del sistema de transporte por oleoducto (STO), detonado por factores de vida útil, fatiga de los materiales y condiciones adversas de trabajo de tipo operativas y ambientales que potencializan la formación de la corrosión en el sistema minimizando así las utilidades finales de la empresa. Los procesos del STO, requieren un nuevo sistema de monitoreo tolerante a patrones generacionales de corrosión (SMT a PCGC), soportado de los sensores en línea que monitorean los parámetros relacionados con su estabilidad. Los sensores nos proveen de información valiosa acerca de las condiciones de operación y dan un estimado acerca de variables críticas del proceso. Así, un sensor puede considerarse como una ventana abierta a través de la cual un proceso puede ser observado. La información de los sensores es vital para monitorear el estado de un proceso y tomar las acciones apropiadas en caso que se presente una perturbación que afecte su estabilidad ([Alabadí & Blázquez, 2008](#)).

Por tanto es necesario buscar alternativas para el correcto monitoreo de este tipo de procesos, a bajo costo, lo cual nos lleva al uso de observadores no lineales que puedan ser utilizados como herramienta dentro de un sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas para ser implementado al STO (García & Frank, 1997). Una vez que se llega a este punto, el siguiente paso sería tener un sistema de monitoreo eficiente sobre el sistema, buscando optimizar el proceso del STO así como minimizar y detectar los PCGC en el sistema, para dar un mejor soporte a la confiabilidad operativa de Pemex Logística, estos combinado con la información de las posibles fallas que pudiesen existir en el sistema, se permite proponer la implementación de un sistema de monitoreo tolerante a fallas, el cual permita a este tipo de equipos continuar su funcionamiento aún ante la presencia de anomalías en su funcionamiento, así como perturbaciones que pudiesen presentarse.

En resumen, la problemática del STO, se centra en su falta de estabilidad y la ineficiencia tecnológica del sistema de monitoreo que tiene como consecuencia problemas operativos, bajo nivel de transporte del producto, así como factores de riesgo que atentan con la calidad del ecosistema, el uso de recursos naturales y en la salud humana. Se representa a continuación de manera gráfica la problemática, mediante un diagrama de Ishikawa en la figura 1.

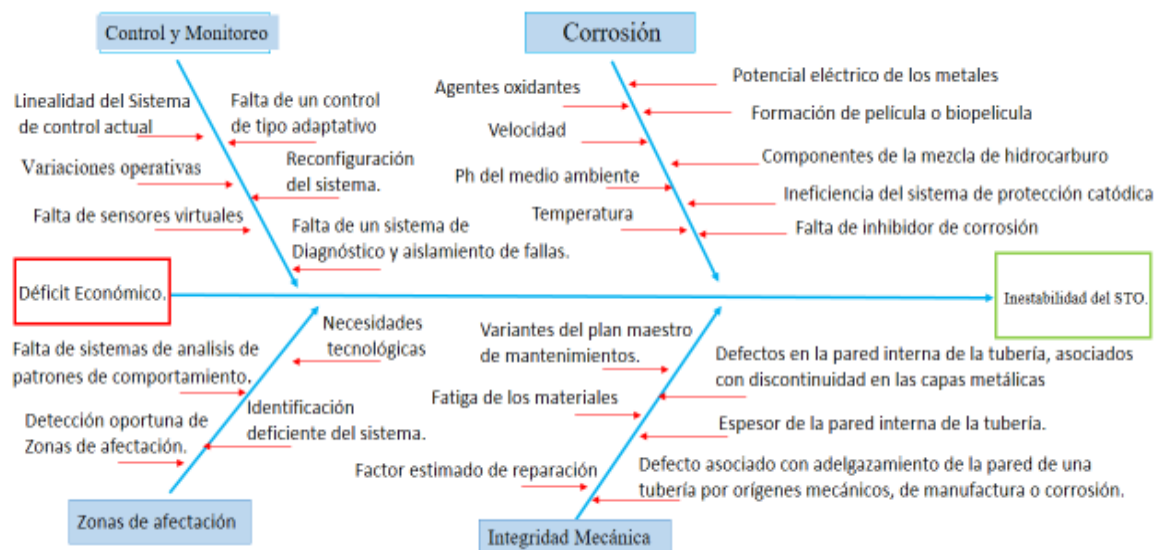


Figura 1. Diagrama de Ishikawa propuesto para este estudio. **Fuente:** Elaboración propia

La inestabilidad del STO, manifiesta altos déficits económicos para la empresa, delimitando programas operativos, así como de mantenimiento, enfatizando esencialmente en las siguientes causas y efectos:

- **Corrosión** – El fenómeno genera presencia en el STO, bajo diversos escenarios como lo son la influencia de la mezcla de hidrocarburo a transportar, capacidad del sistema de protección catódica, potencial eléctrico de los metales, agentes oxidantes, Ph de suelos, entre otros, maximizado por la velocidad, la temperatura de transporte y la inasistencia de inhibidores en el sistema.
- **Integridad Mecánica** – Las afectaciones por corrosión, generan adelgazamientos en las paredes externas e internas del ducto, pérdida de espesores, así como agrietamientos, aumentando la fatiga de los materiales, los factores estimados de reparación del sistema, modificando constantemente el plan maestro de mantenimiento de la empresa.
- **Zonas de Afectación** – Los daños generados por la corrosión, manifiestan la necesidad de nuevas tecnologías en el STO, que identifiquen y analicen los patrones de comportamiento generativos del fenómeno, con la finalidad de detectar zonas vulnerables a tiempo.
- **Control y Monitoreo** - El sistema de control y monitoreo, presenta problemas de linealidad y variabilidad operativa, debido a la inexistencia de un control adaptativo capaz de adecuarse a las condiciones de trabajo actuales, mediante procedimientos de reconfiguración en el sistema de ser necesario, aislando y diagnosticando fallas existentes, mediante herramientas virtuales.

De la problemática expuesta anteriormente, surgen las siguientes preguntas de investigación enfocadas a la gestión integral del STO y sus impactos al medio ambiente y a la salud humana:

¿Por qué es importante maximizar la estabilidad operativa del STO?

¿Cómo afecta la inadecuada ley de control adaptativa al sistema de monitoreo y control de la empresa?

¿Qué efectos genera desconocer la integridad mecánica de mi STO?

¿Cómo afecta la formación inminente del agente “corrosión en los aceros al carbón” al STO?

¿Cómo afecta a la salud humana el derrame de hidrocarburos?

¿Cómo afecta la contaminación de los recursos naturales con hidrocarburos a la calidad del ecosistema?

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

Desarrollar un Sistema de Monitoreo Tolerante a Patrones de Comportamientos Generadores de Corrosión (*SMT-PCGC*) y la inclusión de un Sistema de Análisis Estructural al Sistema de Transporte por Oleoductos (*SAE - STO*), mediante técnicas de control e Inteligencia Artificial (*IA*), las cuales apoyen el proceso de toma de decisiones por medio de la modelación del sistema, lo que permitirá la localización de factores de riesgo.

2.2.2 Objetivos específicos

1. Definir los alcances y objetivos del (*SMT-PCGC & SAE-STO*) a través de los requerimientos principales de los interesados y los requerimientos operativos para el establecimiento de los indicadores a tomar en consideración.
2. Identificación de fallas, *PCGC*, perturbaciones e incertidumbres asociadas al funcionamiento del STO (Análisis estructurado de fallas), con el objetivo de conocer sus variables y los factores inciertos que intervienen en el sistema.

3. Desarrollar un (SMT-PCGC), basado en observadores en tiempo real (SCADA), mediante un sistema de control adaptativo para monitorear y reconfigurar el comportamiento del sistema, con el objetivo de garantizar la estabilidad operativa del STO en condiciones adversas de trabajo.
4. Analizar los posibles casos de reconfigurabilidad que puedan ser llevados a cabo en el sistema (análisis por componentes principales) así como estudiar el comportamiento del sistema: eficiencia/desempeño.
5. Desarrollar un (SAE-STO) mediante dos Sistemas de soporte a la decisión inteligentes el primero para determinar el efecto del uso de mezclas de petróleo crudo en la corrosión de los aceros al carbón y el segundo para aumentar la confiabilidad operativa del sistema de distribución de hidrocarburos de la industria mexicana de petróleo y gas.
6. Analizar resultados obtenidos e identificar procesos más significativos en busca de aportes originales al estado del arte.

2.3 Hipótesis

El desarrollo del (SMT-PCGC & SAE-STO) mediante técnicas de Control e Inteligencia Artificial permitirán deducir o reconfigurar el funcionamiento del sistema establecido (condiciones operativas, perturbaciones corrosivas, puntos críticos en el sistema y modelación de escenarios de riesgo.), minimizando costos de mantenimiento que permitan obtener esquemas de trabajo, que lleven a acciones de adaptación capaces de elevar el nivel de confiabilidad de la industria petrolera.

2.4 Justificación

En México al 2018, las ventas de petróleo equivalían al 16.00 % del Producto Interno Bruto (Pemex, 2017b). El sector petrolero genera empleos directos e indirectos, y según estima la Instituto Nacional de Estadística y Geografía (BP, 2017), contribuyó con aproximadamente el 39.00 % de los ingresos del sector público del país, en el 2017. Con el STO de Pemex Logística, la producción petrolera en México, está decreciendo debido a que cada vez los mantenimientos de dicho sistema, son más costosos con el paso del tiempo y en ocasiones requiriendo infraestructura totalmente nueva en diversas partes del país (D. Supriyatman, Sumarni, Sidarto, & Suratman, 2012a), ésta situación por sí sola, es un problema alarmante para la economía del país. Según información (Pemex, 2017b):

- Al 3 de enero del 2017, los gastos por mantenimiento del sistema de transporte por ducto en el sector Ciudad Mendoza eran por 156 millones 246 mil pesos con 35 centavos; de éstas, el 74.00 % corresponde al transporte de crudo, 11.00 % al transporte de gasolina y diésel, y el 15.00 % a gas seco.
- Del total de proyectos aprobados en 2018 para el sector Ciudad Mendoza, el 68%, son de mantenimientos, protección catódica e infraestructura nueva del sistema de transporte por ducto, con que se espera sean recuperados ductos deficientes por problemas de corrosión y sean eliminadas diversas tomas clandestinas a lo largo del derecho de vía del Sector Ciudad Mendoza.

Aunado a lo anterior, podemos deducir que el papel del crudo en "CO₂" corrosión, ha ganado una atención especial en los últimos años debido a sus altos gastos, producidos por mantenimiento y conservación del sistema de transporte por ducto en la actualidad para petróleos mexicanos. El proyecto de investigación desarrolla de un (SMT a PCGC) en el STO de Pemex Logística, que busca minimizar costos de mantenimientos (Preventivos, Predictivos y Correctivos) y los problemas de transporte de hidrocarburo generados por efectos de corrosión.

El SMT de PCGC, contara con un motor de inferencia de tipo Neuro-Difuso, los cuales combinan la capacidad de aprendizaje de las RNA's (*Redes Neuronales Artificiales*) con el poder de interpretación lingüística de los sistemas de inferencia difusos (*Lógica Difusa*), alimentado de una base de datos en tiempo real generada por el sistema S.C.A.D.A. de la empresa, que ejecutara acciones en caso que existieran una o más fallas en el sistema generadas por efectos de corrosión, aplicado al STO del sector ciudad Mendoza, Veracruz en la sub-gerencia de transporte por ducto de Pemex logística, con la capacidad de regular y actuar con los parámetros operativos correctos. Colaborando de manera adjunta con un sistema de análisis estructural del STO (SAE - STO), conformado por un algoritmo genético capaz de evaluar escenarios de falla, que minimicen la inestabilidad del sistema, se culminara con un análisis de riesgo operativo, económico y ambiental referente a efectos PCGC del STO, el cual demostrara la factibilidad con respecto al tiempo de la empresa, cuya obtención representaría una aportación original al estado del arte.

El STO, puede contar con fallas generadas de diferentes maneras (Sistema Degradado – Sistema Optimo), como lo son en fallas de actuadores, sensores o cambios bruscos en alguna variable de manipulación generada por una perturbación externa (Corrosión). El sistema de monitoreo clásico establecido por la empresa (S.C.A.D.A.) no tiene la característica de ajustarse automáticamente para seguir funcionando en condiciones no deseables. Debido a cambios en variables de salida; y de producirse algún caso de falla, este no será capaz de actuar de forma nominal, ya que dicho sistema funciona al medir y comparar su valor de salida con el de ajuste estableciendo una señal de desviación, generando una señal de salida corregida. Sin embargo, si se presenta alguna falla en un actuador o en algún sensor, éste tipo de estrategia de monitoreo no podrá corregir dicha desviación ya que necesita forzosamente de éstos elementos para su funcionamiento y por lo tanto se tendrá un sistema fallado. Las ventajas que ofrece este proceso de aplicación son: la estrategia de monitoreo tolerante en un STO, que garantice se cumplan los objetivos preestablecidos en él sistema, aun ante la presencia de fallas, díganse fallas en sensores y actuadores, para lograr que se mantenga el funcionamiento, y la estabilidad del proceso, y en un siguiente caso, la seguridad, esto para salvaguardar la integridad del equipo, y aún más importante, de los operadores que en el trabajen.

2.5 Estructura Metodológica

Se aborda la metodología del (SMT a PCGC & SAE-STO), propuesta a partir de la revisión del estado del arte. Mediante un enfoque sustentado, por las teorías del control tolerante a fallas y las técnicas de Inteligencia Artificial. Los pasos desarrollados se muestran a continuación y se analizan a detalle en el documento. (Ver Figura 2):

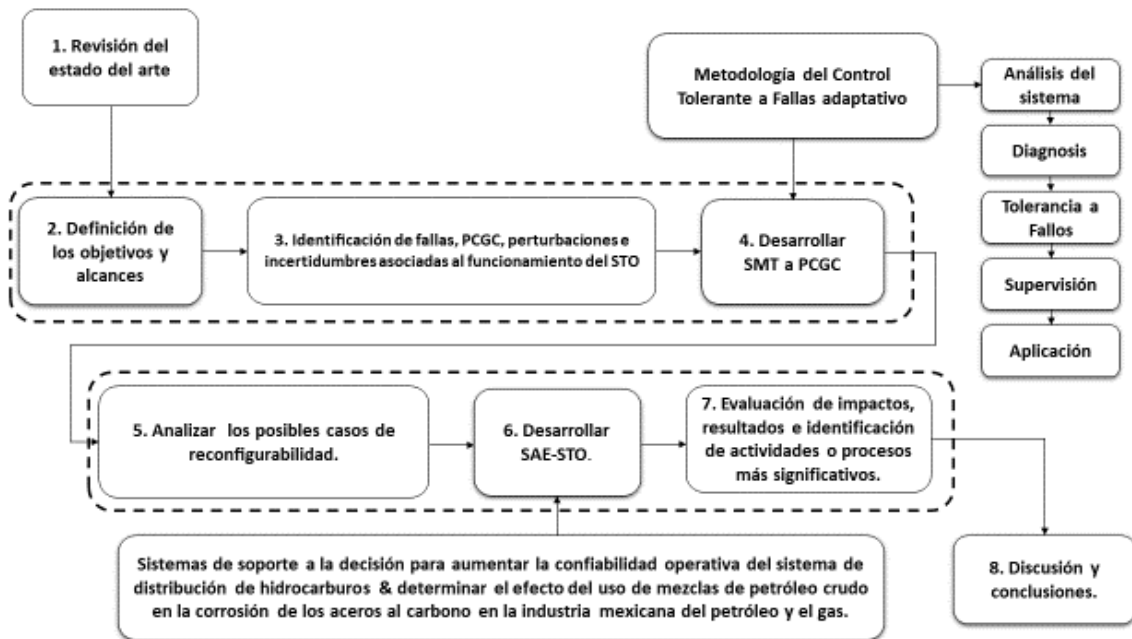


Figura 2. Diseño metodológico para la investigación. *Fuente:* Elaboración propia.

A continuación, se describen los pasos de la metodología de la investigación a detallé:

1. **Revisión del estado del arte.** Comprende la revisión extensamente la bibliografía, con el objetivo de definir claramente los alcances del estudio.
2. **Definición de los objetivos y alcances.** Deberán ser claros y consistentes con la aplicación que persiguen. Se establecen a través de las preferencias de los interesados, con el fin de que todos los criterios sean satisfechos en la investigación (contempla la

unidad funcional, los límites del sistema, los tipos de impacto y metodología para evaluar esos impactos, hipótesis, etc.).

3. **Identificación de fallas, PCGC, perturbaciones e incertidumbres asociadas al funcionamiento del STO.** Comprenden la obtención de datos cualitativos/cuantitativos y los procedimientos operativos establecidos, (Análisis estructurado de fallas), con el objetivo de conocer sus variables y los factores inciertos que intervienen en el sistema.

4. **Desarrollar SMT a PCGC.** Este paso se construyó un sistema en base a observadores en tiempo real (SCADA), soportando su versatilidad mediante un sistema de control adaptativo de tipo Neuro-Difuso, que ejecutara acciones en caso que existieran una o más fallas en el sistema generadas por efectos de corrosión, aplicado al sistema de transporte por oleoducto (STO), los pasos estructurales de desarrollo del sistema se muestran a continuación en la figura 3:

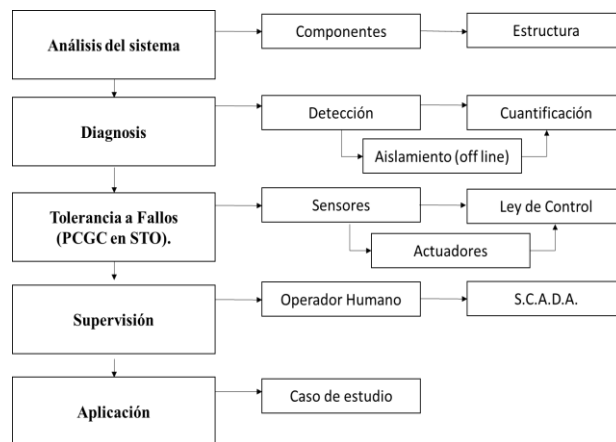


Figura 3. Diseño metodológico para el desarrollo SMT a PCGC.

Fuente: [Elaboración propia.](#)

5. **Analizar los posibles casos de reconfigurabilidad.** Se analizan los posibles escenarios de reconfigurabilidad que puedan ser llevados a cabo en el sistema, mediante la aplicación de algoritmos genéticos que permitan minimizar la gestión de fallas únicas las cuales son puntos de atención crítica para el STO.

6. **Desarrollar SAE-STO.** Comprende la conjunción diferentes técnicas con el fin de realizar un análisis estructural del STO, mediante software especializado, considerando técnicas de inteligencia artificial y simulación Monte Carlo, para examinar el comportamiento generacional de la corrosión en los aceros al carbón, mediante la evaluación de puntos críticos en el sistema y modelando factores de riesgo bajo escenarios técnicos, operativos u económicos, el cual demostró su factibilidad con respecto al tiempo.
7. **Evolución de impactos, resultados e identificación de actividades o procesos más significativos.** De acuerdo a los indicadores establece medidas correctivas para el sistema, considerando los resultados obtenidos.
8. **Discusión y conclusiones (Aportación científica al estado del arte).** Aportar conocimiento a la ciencia, al desarrollo tecnológico y a la sociedad, sobre el tema de estudio desarrollado en instalaciones petrolíferas deterioradas y vandalizadas en México, aplicable en campos internacionales.

Los costos por corrosión, vandalismo y mantenimiento correctivo por fallo estructural en oleoductos, son temas de interés para las industrias petroleras del mundo. En donde la metodología de diseño propuesta con las capacidades de adaptación dinámicas ofrecidas por FTCS, considera ser una nueva alternativa fiable para el manejo de un STO, capaz de reconfigurar el funcionamiento del sistema aun en condiciones de fallo, modelando los comportamientos corrosivos del oleoducto mediante IA, por su capacidad adaptativa ante otros modelos. El SMT a PCGC, está estructurado por subsistemas y escenarios de fallo, que analizan el comportamiento evolutivo de la corrosión por oxígeno (O₂) y dulce (CO₂), generadas por bajas cantidades de la mezcla de hidrocarburo en el proceso de transporte y por contenidos acuosos en sus fases, a través de un perfil operativo (*sub sistema 1*). Corrosión ácida (H₂S) y galvánica (GC), potencializada por la corrosividad del suelo en donde se encuentra enterrado el oleoducto, por indicadores de pH y resistividad, con una asociación directa a los SPA (*sub sistema 2*).

El emplear equipos de flujo ultrasónico de inspección para analizar la integridad mecánica de un STO, contribuye a identificar zonas de influencia corrosiva interna o externa en las paredes de la tubería (*Sub sistema 3*), así como la conjunción de procedimientos metalográficos de laboratorio a través de ensayos de tracción mecánica para determinar una caracterización confiable del material bajo normativas internacionales (*sub sistema 4*). La evaluación y los resultados de los diferentes sub sistemas, representan una fuente de información confiable para determinar patrones evolutivos de corrosión en un STO, mediante un enfoque integral ante los modelos de predicción analizados en la literatura, sin embargo no es posible comparar los resultados obtenidos ante un sistema de monitoreo integral de un STO, ante su falta de existencia y la comparación aislada de los sub sistemas, no generaría una visión integral para propósitos de la investigación.

CAPITULO 3 MARCO TEORICO

3.1 La industria Petrolera en México.

El petróleo sigue siendo el principal combustible del mundo, en el año 2017 la producción mundial de petróleo crudo disminuyó en 701,000 b/d en comparación con el año 2016, para alcanzar 74,69 millones b/d, marcando el primer descenso anual desde 2009. La producción de petrolera para los países miembros de la OPEP continúa a la baja, como es el caso de Venezuela 338,000 b/d, al contrario de los países que no pertenecen a la misma, que registran ganancias de 498,000 b/d para los Estados unidos y 427,000 b/d para libia ([OPEC, 2018a](#)). La industria petrolera es una actividad económica importante para el mundo porque esta industria genera numerosos empleos, tanto directa como indirectamente, desde su extracción hasta su comercialización final. El precio del barril de petróleo se encuentra tasado en la oferta y demanda mundial, el cual desde el 2013 ha mostrado cambios significativos a la fecha, la información anterior se muestra en la figura 4.

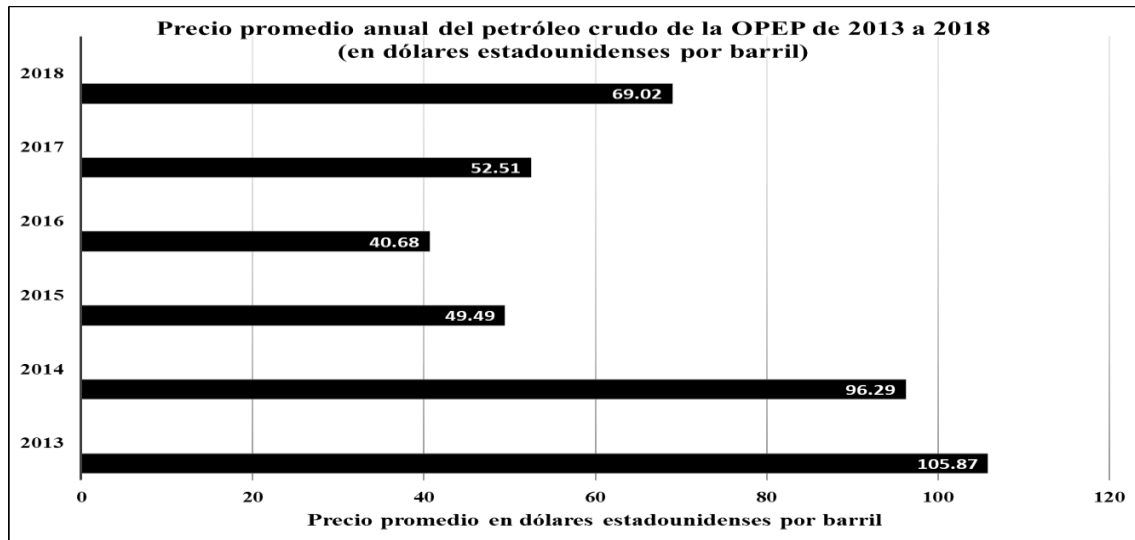


Figura 4. Precio promedio anual del petróleo crudo de la OPEP de 2013 a 2018 (en dólares estadounidenses por barril) **Fuente:** (OPEC, 2018b).

El Sistema de transporte por ducto es la herramienta principal de transporte del sector petrolero, por su gran capacidad de transporte y su bajo costo en la relación peso-distancia del producto a trasladar, contando con el más alto índice de confiabilidad para entregar un producto a tiempo ante embarcaciones, ferrocarriles, camiones o aviones (Philip Kotler/ Gary Armstrong, 2012) la información anterior se describe en la Tabla 1.

Tabla 1. Fuente: (Philip Kotler/ Gary Armstrong, 2012).

Orden de importancia de los medios de transporte (1= Mas importante).

	Rapidez (Tiempo de entrega)	Confiabilidad (Entrega a tiempo)	Capacidad (Diversidad de productos)	Disponibilidad (Diversidad Geográfica)	Costo (Tonelada -Milla)
Ferrocarril	3	4	2	2	3
Barco	4	5	1	4	1
Camión	2	2	3	1	4
Ducto	5	1	5	5	2
Avión	1	3	4	3	5

El STD, es un medio de transporte que puede emplearse de manera marítima, terrestre o aérea según las necesidades geográficas de la empresa, el cual suele volverse inestable bajo

ciertas condiciones de trabajo tales como: variaciones operativas de succión y descarga de un producto, perturbaciones referentes a integridad mecánica en el sistema por efectos de corrosión interna o externa, la cual suele fortalecerse bajo diversos escenarios y mostrándose inmune en ocasiones ante la aparición de inhibidores de corrosión (G. & F., 2014). Si las perturbaciones no son controladas a tiempo pueden causar un mal funcionamiento del sistema, llevando al STD a una desestabilización.

Pemex Logística.

Pemex Logística está considerada como una de las cinco empresas más grandes de logística de hidrocarburos, en término de activos y la única en México con capacidad de transportar, tratar y almacenar crudo y petrolíferos. Con la apertura de mercados, tiene el reto de competir en un mercado regulado, con lo que, además de dar servicio a Pemex, puede atender a otras empresas aplicando tarifas competitivas.

La empresa presta servicios de transporte y almacenamiento de hidrocarburos principalmente a Pemex Transformación Industrial y a Pemex Exploración y Producción y a terceros (Comisión Federal de Electricidad, Aeropuertos y Servicios Auxiliares, a distribuidores de gas licuado, gasolinas y estaciones de servicio) y de operación y mantenimiento al Centro Nacional de Control de Gas Natural. Durante 2017, se inyectaron 1,887 Mbd de petróleo crudo y productos petrolíferos, significando una disminución del 10.9% en comparación con 2016 en que la inyección fue 2,117 Mbd. La disminución se atribuye principalmente a una menor disponibilidad de crudo de Pemex Exploración y Producción y a un menor proceso de crudo en el Sistema Nacional de Refinación. Durante 2017 se inyectaron 138 Mbd de gas licuado del petróleo, comparados con 146.3 Mbd en 2016, lo que representó una disminución del 5.7%, debido a un menor proceso de gas en los complejos procesadores (Pemex, 2017a). Con relación al transporte de gas natural, el 1 de enero de 2016 dio inicio la prestación de servicios de operación, mantenimiento y tecnologías de información (SCADA) al Centro Nacional de Control de Gas Natural. Durante 2017 se transportaron aproximadamente 5,196 millones de pies cúbicos diarios de gas natural, una reducción de 4.5% en comparación con los 5,440 millones de pies cúbicos diarios que se transportaron en 2016, (Pemex, 2017a).

3.2 Control tolerante a fallas

Los sistemas de control tolerante a fallas, fueron en origen diseñados, para ser implementados en procesos propensos a ocurrencia de malos funcionamientos, ya sea en los sensores, actuadores, o distintos componentes que formaran parte de la estructura de dichos sistemas. Por lo que una primera consideración para llevar a cabo su diseño, es conocer el tipo de fallas de las que el sistema pudiese ser objeto, tal manera se pudieran generar estrategias que permitieran al mismo, seguir funcionando a pesar de la ocurrencia de estas últimas, si tal vez el sistema no pudiese tener su funcionamiento nominal, si optimizar su funcionamiento de acuerdo a la situación a la que este se enfrente. [Jiang, \(2005\)](#).

En el estado del arte, se consideran 2 tipos de control tolerante a fallas. El control tolerante a fallas pasivo y el control tolerante a fallas activo, el primero tiene la característica principal la propiedad de robustez ante la existencia de una falla o perturbación que llegue a ocurrir durante un proceso, lo que llevaría a cabo un cambio en la ley de control que gobierna al sistema, por tanto este tipo de control se considera contiene características intrínsecas de robustez, que permite al sistema continuar con su operación óptima ante determinadas fallas que se pudieran suscitar en el mismo, entre este tipo de sistemas destacan las técnicas lineal cuadrática, control robusto H_∞ , control por modos deslizantes y desigualdades matriciales lineales (LMI) ([Berdjag D. Staroswiecki, et al, 2010](#)).

Por su parte el control tolerante a fallas activo consiste en diagnosticar en línea las posibles fallas que se pudiesen generar durante el proceso, determinar el origen y tamaño de la misma, esto mediante la implementación de un sistema de diagnóstico e identificación de fallas, y que este pudiera proveer información a un mecanismo de acomodación o re configuración del control, para que el sistema pueda seguir operando a pesar de la falla, tal manera se pudiesen llegar a tomar medidas correctivas sin parar el proceso, la estrategia que lleva a cabo este control depende del sistema a controlar, ejemplo, de existir redundancia material

en sensores, al detectar una falla en alguno, otro sensor de la misma variable tomaría su lugar, de no ser el caso, un sensor virtual permitiría al sistema continuar funcionando, en el caso de actuadores, de haberse degradado el mismo, se buscaría cambiar la dinámica del mismo, para continuar de la mejor manera, con su funcionamiento (Jiang J. Zhang, 2008). En la figura 5 se muestran las distintas técnicas de control tolerante a fallas que se pueden encontrar en el estudio de la bibliografía.

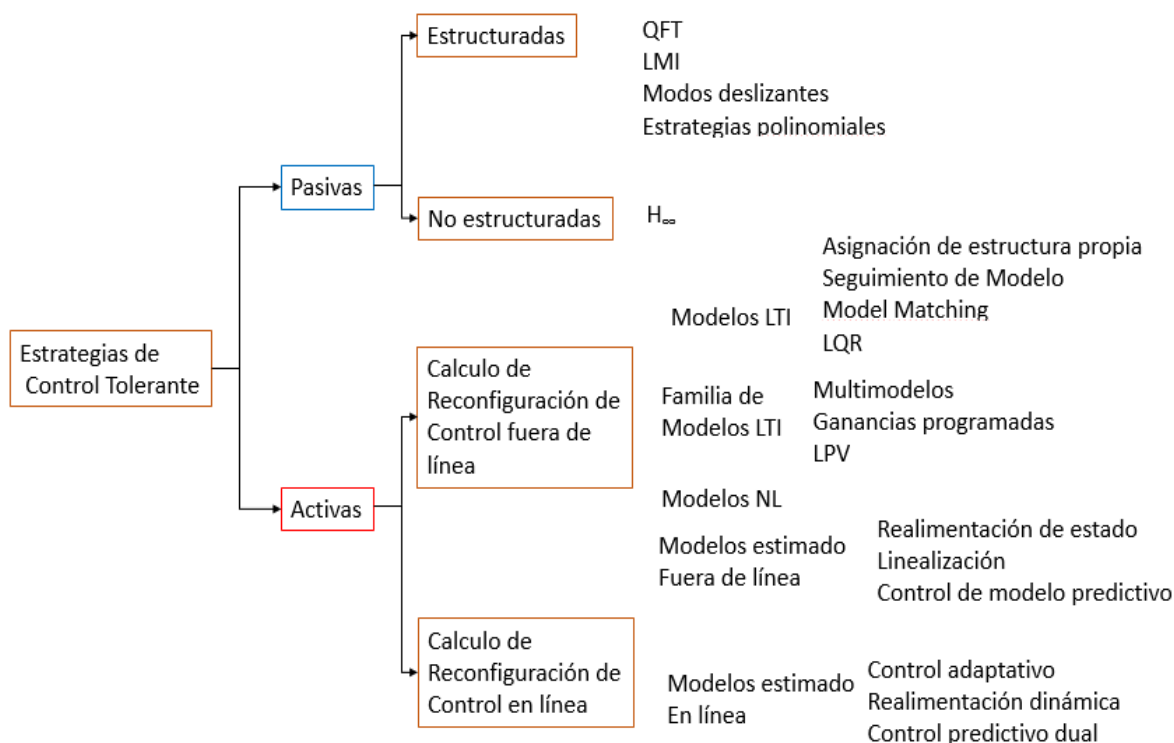


Figura 5. Métodos de control tolerante a fallas. *Fuente:* (Jiang J. Zhang, 2008).

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo llevar a cabo un SMT de tipo activo, de acuerdo a lo estudiado en el estado del arte, se consideró la técnica de control adaptativo, la cual presenta un alto grado de insensibilidad a perturbaciones, incertidumbre que pudiesen existir en el modelado del sistema, así como el alto nivel de robustez que presenta, este método clásicamente conocido como un enfoque pasivo, se pretende implementar de forma que se considere un SMT activo, considerando la metodología expresa en la figura 6 (Jiang J. Zhang, 2008), mediante la implementación de un sistema de diagnóstico que nutra al controlador y permita generar una reconfiguración de la ley de control que rige al proceso, ante la ocurrencia de fallas en el mismo.

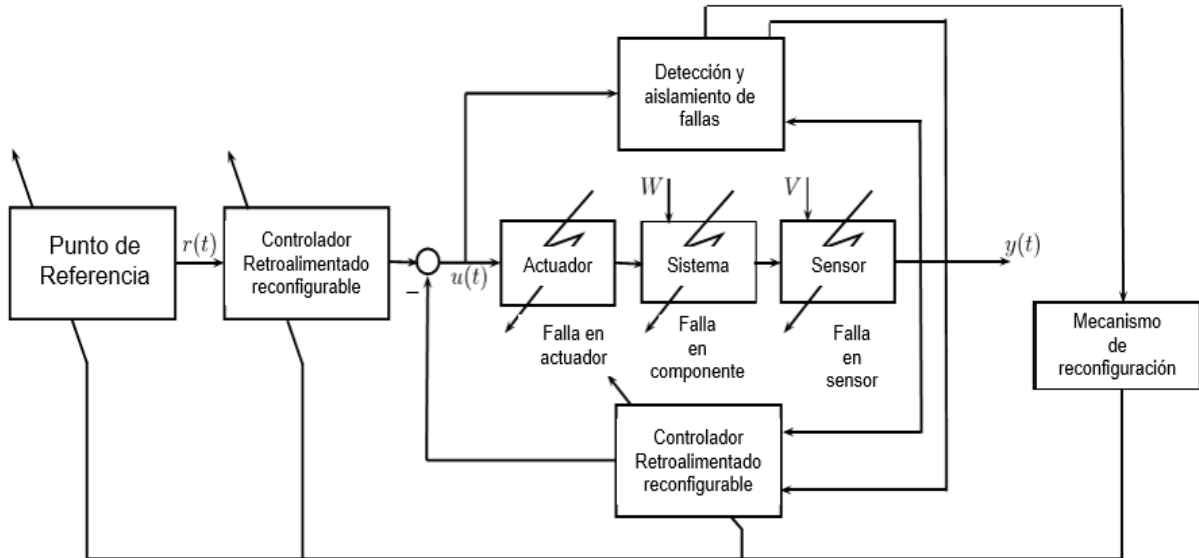


Figura 6. Esquema de control tolerante a fallas. *Fuente:* (Jiang J. Zhang, 2008).

3.3 Simulación Monte Carlo.

La simulación Monte Carlo es una técnica que combina conceptos estadísticos (muestreo aleatorio) con la capacidad que tienen los ordenadores para generar números pseudo-aleatorios y automatizar cálculos, con lo cual imita, mediante modelos matemáticos, el comportamiento aleatorio de sistemas reales. Se llamó así en referencia al Casino de Monte Carlo (Principado de Mónaco) por ser “la capital del juego de azar”, al ser la ruleta un generador simple de números aleatorios.

El método Monte Carlo proporciona soluciones aproximadas a una gran variedad de problemas matemáticos posibilitando la realización de experimentos con muestreo de números pseudoaleatorios en una computadora. El método es aplicable a cualquier tipo de problema, ya sea estocástico o determinista. A diferencia de los métodos numéricos que se basan en evaluaciones en N puntos en un espacio M -dimensional para producir una solución aproximada, el método Monte Carlo tiene un error absoluto de la estimación que decrece en virtud del Teorema Central del Límite. Su metodología general puede ser ilustrada en tan sólo cuatro pasos como se muestra a continuación en la figura 7.



Figura 7. Metodología del método Monte Carlo. *Fuente:* (Librería nacional de estados unidos de américa, 2018).

3.3.1 Algoritmo de simulación Monte Carlo.

El algoritmo de simulación Monte Carlo Puro se fundamenta en la generación de números aleatorios por el método de Transformación inversa, el cual se basa en las distribuciones acumuladas de frecuencias, como se muestra en la figura 8.

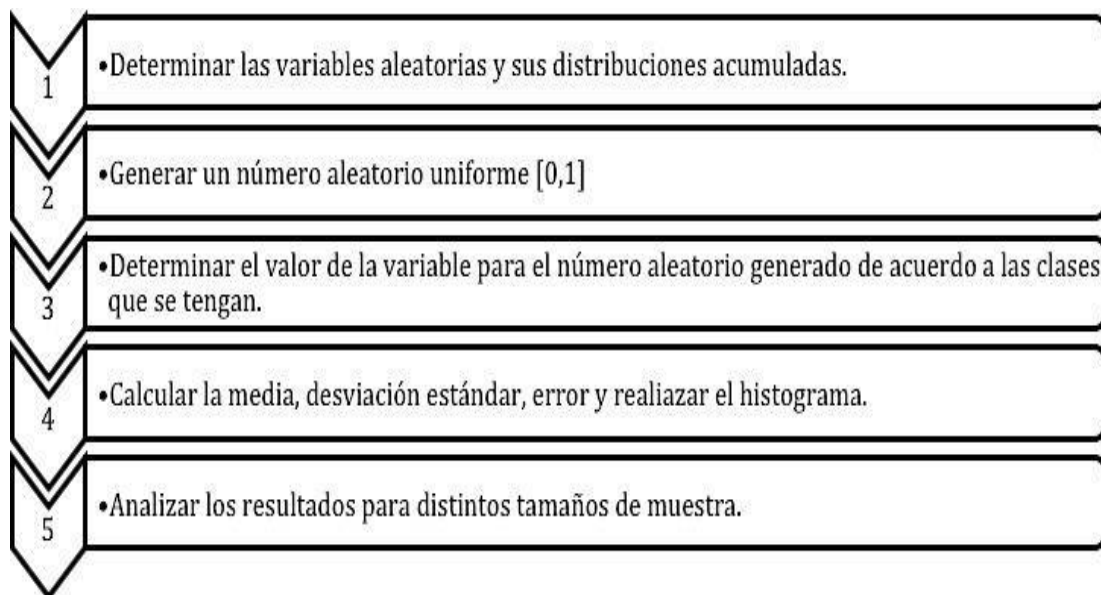


Figura 8. Algoritmo de método Monte Carlo. *Fuente:* (Colegio Cara pangué, Chile, 2018).

3.3.2 Análisis de riesgo con simulación Monte Carlo.

El concepto de riesgo aparece con el reconocimiento de la incertidumbre del futuro: la incapacidad de saber qué sucederá en el futuro como consecuencia de una acción presente. El riesgo se refiere acciones que pueden tener más de un resultado. En este sentido, toda acción es “arriesgada”, pero generalmente este término se reserva para describir situaciones en las que el rango de posibles resultados de una acción es significativo.

El riesgo se deriva de nuestra incapacidad de predecir el futuro e indica un grado de incertidumbre suficientemente importante como para que lo percibamos.

Esta imprecisa definición se define un poco más cuando se mencionan algunas de las características más importantes del riesgo, las cuales son:

1. El riesgo puede ser objetivo o subjetivo.
2. Decidir si algo es arriesgado o no requiere el uso del juicio personal.
3. El riesgo es evitable (al no participar en las actividades que ocasionan el riesgo).

Si ya ha sido cuantificado el riesgo, es decir se han determinado los posibles resultados y las probabilidades de que ocurran éstos, es posible resumir este riesgo utilizando una distribución de probabilidad. Una distribución de probabilidad es una forma de presentar el riesgo cuantificado de una variable. En la simulación Monte Carlo es posible hacer uso de numerosas distribuciones, con las cuales es posible representar casi cualquier comportamiento. Todas las distribuciones utilizan una serie de argumentos para especificar un rango de valores reales y su distribución de probabilidad. La distribución normal, por ejemplo, utiliza como argumentos una media y una desviación estándar. La media define el valor alrededor del cual se centrará la curva de campana, y la desviación estándar define el rango de valores alrededor de la media.

3.4 Inteligencia Artificial

La Inteligencia Artificial (IA) está ayudando a expandir el horizonte del tratamiento de la información. Parte de esta expansión se debe a la extensión de las fronteras de la tecnología. La IA, se define como el estudio de las facultades mentales a través del uso de modelos computacionales. Otra definición más extendida es la de Hayes que consideró que la Inteligencia Artificial es la implementación de razonamientos inteligentes mediante técnicas propias de la computación. Esta segunda definición establece un lazo de unión entre la máquina, la inteligencia y la actividad del ser humano. En el campo pionero de la IA, se encuentran los sistemas expertos (SE), que son básicamente un conjunto de programas informáticos que aplica el proceso del razonamiento humano al conocimiento de un experto en la solución de tipos específicos de problema (Pajares et al, 2006).

3.4.1 Red Neuronal Artificial (RNA)

Una Red Neuronal Artificial es un proceso sólido y paralelamente distribuido con la propensión natural a acumular procedimientos experimentales y hacerlos disponibles para su uso. Se parece al cerebro en dos aspectos, por una parte, la red adquiere conocimientos a través de un proceso de aprendizaje, y por otra las conexiones inter neuronales, conocidas como cargas sinápticas presentan una gran solidez y se encargan de almacenar los conocimientos. A continuación, se presentan dos definiciones:

“Un sistema de computación hecho por un gran número de elementos simples, elementos de proceso interconectados, los cuales procesan información por medio de su estado dinámico como respuesta a entradas externas.” (Hecht, 1988a).

“Redes neuronales artificiales son redes interconectadas masivamente en paralelo de elementos simples (usualmente adaptativos), y con organización jerárquica, las cuales intentan interactuar con los objetos del mundo real del mismo modo que lo hace el sistema nervioso” (Kohonen, 1988c).

3.4.1.1 Elementos que componen a una red neuronal artificial

La función de red es típicamente la suma ponderada, mientras que la función de activación suele ser alguna función de tipo sigmooidal, como se muestra a continuación en la figura 9.

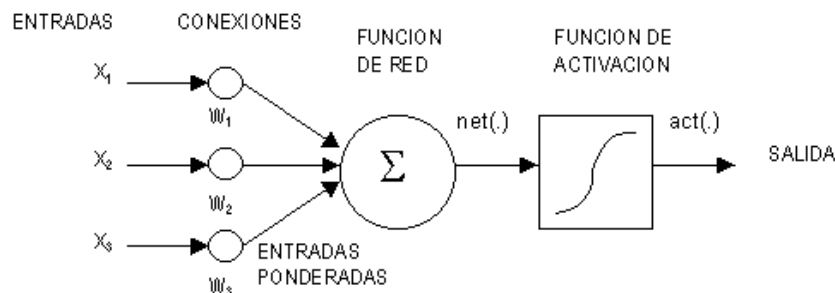


Figura 9. Elementos que componen la RNA.

Fuente: (Curso-Taller, integración de simulación con Inteligencia Artificial, Báez 2008).

“Función de propagación o de red”. Calcula el valor de base o entrada total a la unidad, generalmente como simple suma ponderada de todas las entradas recibidas.

“Función de activación”. Es quizás la característica principal o definitoria de las neuronas, la que mejor define el comportamiento de la misma. Se encarga de calcular el nivel o estado de activación de la neurona en función de la entrada total.

“Conexiones ponderadas”. Hacen el papel de las conexiones sinápticas, el peso de la conexión equivale a la fuerza o efectividad de la sinapsis.

“Salida”. Calcula la salida de la neurona en función de la activación de la misma. El valor de salida cumpliría la función de la tasa de disparo en las neuronas biológicas.

3.4.1.2 ¿Para qué sirven las redes neuronales artificiales?

Las redes neuronales son capaces de aprender complejas relaciones de datos. Al imitar las funciones de un cerebro, pueden diferenciar patrones de datos y luego extrapolar predicciones cuando se introducen nuevos datos. Los problemas en los que se usan redes neuronales se pueden dividir en dos grupos generales:

- Problemas de clasificación: Problemas en los que se trata de determinar el tipo de categoría al que pertenece un elemento desconocido. Como ejemplo están los diagnósticos médicos o las predicciones de capacidad de pago de un crédito.
- Problemas numéricos: Situaciones en las que debe predecir un resultado numérico específico. Como ejemplo están la previsión del precio de acciones o la predicción.

3.4.1.3 Funcionamiento de una RNA

El funcionamiento de una red sería el siguiente: Se dispone de una serie de datos (situaciones del pasado) y asociados a ellos la respuesta deseable de la red (training set).

La red de algún modo observa estos hechos y aprende de ellos (entrenamiento o aprendizaje), de modo que cuando se encuentre en una nueva situación actúe de modo coherente con lo aprendido. Para evaluar el comportamiento de la red ante nuevas situaciones se considera un nuevo subconjunto de datos (validación set), independiente del conjunto de entrenamiento.

3.4.1.4 Ventajas de la RNA

1. Aprendizaje Adaptativo: Tareas basadas en un entrenamiento o en una experiencia inicial.
2. Auto-organización: Crear su propia organización o representación de la información: etapa de aprendizaje.
3. Tolerancia a fallos: Algunas capacidades de la red se pueden retener, incluso sufriendo un gran daño.
4. Operación en tiempo real: Los cálculos neuronales pueden ser realizados en paralelo.
5. Fácil inserción dentro de la tecnología existente: Chips especializados para redes neuronales que mejoran su capacidad en ciertas tareas, facilitando la integración modular en los sistemas existentes ([Palisade Corporation, 2010](#)).

3.4.2 Control adaptativo (Neuro –Difuso).

El avance de los sistemas de Inteligencia Computacional y la búsqueda de soluciones cada vez más completas para los problemas que pueden ser resueltos por estos métodos, han llevado a la unión de técnicas de software. Esto resulta ser una fuerte motivación para realizar la unión de las técnicas de Redes Neuronales Artificiales y Lógica Difusa. En la Tabla 2, se pueden observar las similitudes y diferencias entre estas dos técnicas (Juan J. Puello and Rafael A. Rodríguez, 2002).

Existen motivaciones para crear los sistemas híbridos neuro-difusos, entre estos los siguientes:

1. Los problemas a resolver con estas técnicas inteligentes tienen generalmente componentes de datos empíricos y otros de conocimientos previos, que con los sistemas neuro-difusos pueden resolverse aprovechando los métodos cuantitativos y cualitativos de las RNA y la LD respectivamente.
2. La expresión de conocimiento como una base de reglas lingüísticas, enriquecida o surgida con o a través de datos cuantitativos, es una forma adecuada para hacer realimentación al usuario humano de la forma como el sistema realiza las tareas.
3. Habiendo encontrado que la representación del conocimiento como un Sistema Experto Difuso se acerca a la forma de razonamiento humana, es natura intentar adicionar a estos Sistemas capacidades de aprendizaje, de forma que se emule mejor tal comportamiento o que se mejoren los resultados obtenidos con el sólo SED.

Tabla 2

Diferencias y Similitudes entre las RNA y LD. **Fuente:** (Juan J. Puello and Rafael A. Rodríguez, 2002).

Característica	RNA	LD
<i>Paralelismo</i>	Bueno	Bueno
<i>Dominio</i>	Continuo	Continuo
<i>Linealidad</i>	No lineal	No lineal
<i>Base de Conocimiento</i>	Distribuida en pesos	Distribuida en base de reglas
<i>Método de Solución</i>	Matemática mediante propagación de la información de entrada	Razonamiento sobre la Base de Reglas
<i>Representación del conocimiento</i>	Númerica	Lingüística
<i>Conocimiento explotado</i>	Datos empíricos	Conocimiento humano previo
<i>Capacidad de aprendizaje</i>	Alta	No tiene - Es una forma Lógica de tratamiento Matemático.

La estructura Neuro-Difusa permite el uso de métodos cualitativos y cuantitativos en la construcción de modelos, en la etapa de aprendizaje, el funcionamiento y la realimentación de un conocimiento al usuario, permitiendo así, que todo el conocimiento disponible se procese de manera adecuada.

Los métodos cuantitativos se observan en el aprendizaje que los sistemas Neuro-Difusos se pueden realizar a partir de datos del ambiente y en su forma matemática de funcionamiento, mientras que los métodos cualitativos se reflejan en el sentido lingüístico que tiene la base de conocimiento de los sistemas difusos y generan una interacción sistema-hombre, permitiendo la introducción de conocimiento previo al sistema y la realimentación del estado final del modelo en forma de reglas expresadas lingüísticamente desde el sistema al hombre. Las otras ventajas, son las conocidas ya ampliamente y que vienen heredadas de los Sistemas Difusos y de las RNA, tales como interpretación lingüística, introducción de conocimiento previo, autoaprendizaje, generalización, interpolación, entre otros. (Juan J. Puello and Rafael

A. Rodríguez, 2002). Se sabe que los Sistemas Neuro-Difusos resultan de la fusión entre las Redes Neuronales Artificiales y la Lógica Difusa. Por tanto, existen varias combinaciones entre estas técnicas que a continuación se mencionan:

1. Modelos Concurrentes: Cuando la RNA y el Sistema Difuso trabajan juntos, pero sin interactuar el uno en el otro, es decir, ninguno determina las características del otro.

2. Modelos Cooperativos: Cuando la RNA se usa para determinar los parámetros de funcionamiento del Sistema Difuso. En estos modelos, se distinguen dos fases: la de Entrenamiento y la de Funcionamiento. En la primera, la RNA interactúa con el Sistema Difuso determinando los parámetros del mismo, mientras en la segunda, la RNA desaparece dejando sólo el Sistema Difuso. Un ejemplo de estos sistemas puede ser la determinación de parámetros de Control de un Sistema Difuso, etc.

3. Modelos Híbridos: En esta aproximación, los Sistemas Difusos y de RNA, trabajan juntos en una arquitectura homogénea que puede ser interpretada como una RNA con parámetros Difusos o como un Sistema Difuso con parámetros o funcionamiento distribuidos.

3.4.3 Algoritmos genéticos

Resulta evidente que una empresa y/o persona desee gastar lo menos posible en un insumo, obtener el máximo beneficio en una inversión, por mencionar algunos casos, optimizar. Es posible entender por optimización, al ajuste realizado sobre la(s) entrada(s) de un proceso/sistema, de tal modo, que la(s) salida(s) se maximice(n), minimice(n) o se obtenga un valor deseado -valor nominal-.

Para éste tipo de escenarios, han sido desarrollados diversos modelos matemáticos mono criterio y multicriterio (la programación lineal, la ruta crítica, la teoría de juegos, la programación por metas, la ponderación lineal, el proceso analítico jerárquico), modelos generalmente planteados, bajo condiciones de certeza, modelos matemáticos determinísticos.

Si bien es cierto que, a través del tiempo se han desarrollado modelos determinísticos, que proveen soluciones factibles -incluso óptimas-, para una diversidad de escenarios, éstos suelen ser ineficientes, cuando el problema se torna robusto, debido a que, la complejidad crece exponencialmente con el tamaño del problema. Los problemas reales son dinámicos, inciertos e involucran una gran cantidad de factores, cualidades que -en ocasiones-, influyen a que el espacio de soluciones factibles, se constituya de una gran cantidad de crestas y valles de diferentes magnitudes, dificultando la búsqueda de la solución, debido a que se puede caer en óptimos locales, o en el mejor de los casos, en el óptimo global. En éste contexto, los avances de [Alan Turing and Von Neumann \(2019\)](#), contribuyeron significativamente en el proceso de cálculo, y en la resolución de problemas. El comportamiento de los problemas reales, ha dado apertura a una nueva generación de métodos de búsqueda -inspirados en la optimización natural-. Los cuales, realizan una exploración estocástica, siendo su principal objetivo, la localización del óptimo global. Algunos de éstos métodos incluyen -pero no están restringidos a-, los Algoritmos Genéticos (GA's, por su acrónimo en inglés), el Recocido Simulado (SA, por su acrónimo en inglés), la Optimización de Enjambre de Partículas (PSO, por su acrónimo en inglés), la Optimización por Colonia de Hormigas (ACO, por su acrónimo en inglés) y los Algoritmos Evolutivos (EA's, por su acrónimo en inglés). La potencialidad de éstos métodos, radica en que son capaces de, generar el espacio de soluciones factibles de cualquier problema modelado, sujeto a las restricciones del mismo, y mediante una búsqueda, que realizan sobre el espacio, su objetivo se centra en encontrar el(los) valor(es) de la(s) entrada(s), que optimice(n) la(s) salida(s), en valor(es) óptimo(s) global(es), considerándose así, como métodos inteligentes. Los métodos inteligentes, son capaces de resolver problemas reales, en donde, la incertidumbre y complejidad coexisten, se maximiza más de un criterio al mismo tiempo (optimización multicriterio o multiobjetivo), así mismo cuando, una infinidad de factores están inmersos.

3.4.3.1 Operadores genéticos de un GA

La forma más simple de un GA, consiste en tres tipos de operadores: selección, cruce y mute.

- Selección - Éste operador, selecciona a los cromosomas de la población, para la reproducción. El cromosoma con mayor aptitud, tiene mayor probabilidad de ser seleccionado, para reproducirse (Mitchell, 1999). Existen diversos métodos de selección³⁰, dos de ellos son los más comunes (Coello, 1995):

La ruleta: es un método muy simple, aplicado por Goldberg en su libro publicado en 1989, denominado *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, el cual, consiste en crear una ruleta, en la que cada cromosoma tiene asignada una fracción proporcional, a su aptitud, sí se cuenta con una población de cinco cromosomas- Ésta ruleta es girada cinco veces, para determinar que individuos serán seleccionados. Debido a que, los individuos más aptos, tienen asignada un área mayor de la ruleta, se espera sean seleccionados más veces, que los menos aptos.

El torneo: la idea de éste método, es muy simple. Se baraja la población, y después, se hace competir a los cromosomas que la integran, en grupos de tamaño predefinido en un torneo (normalmente se compite en parejas) del que resultarán ganadores, aquéllos que, tengan los valores de aptitud más altos. Sí, un torneo binario es realizado en competencia por parejas, entonces, la población se debe barajar dos veces. Se puede apreciar que, ésta técnica garantiza la obtención de múltiples copias, del individuo más apto, entre los progenitores de la siguiente generación. Sí, un torneo binario es realizado, el mejor individuo se seleccionará dos veces.

- Cruce - A ésta operación genética, también se le conoce como, reproducción sexual de los individuos seleccionados. Es en ésta etapa, donde los individuos intercambian material cromosómico, y sus descendientes formaran la población, de la siguiente generación.

Las dos formas de cruce más comunes son: el uso de un punto único de cruce y el uso de dos puntos de cruce (Coello, 1995). Cuando un punto de cruce es utilizado, se selecciona de forma aleatoria un punto, sobre el que se realizará el intercambio del material cromosómico.

- Mutación - El operador mute, aleatoriamente invierte algunos bits, en un cromosoma, si, es utilizada una codificación binaria, el gen seleccionado se sustituye por su complemento (*i.e.*, un cero cambia en uno y viceversa).

De la misma manera que el cruce, la mutación, es manejada como un porcentaje, el cual, indica la frecuencia con la que se realizará, aunque, se distingue la primera por ocurrir con mayor frecuencia. El porcentaje de cruce, normalmente es de más del 60.00 %, mientras que, el de mutación normalmente no pasa del 5.00 %, (Coello, 1995). Una distinción importante, en los dos últimos operadores genéticos, es que, el cruce efectúa un proceso de convergencia en la solución, mientras que, la mutación, efectúa un proceso de divergencia, explora el espacio de soluciones para buscar el óptimo global. Además, cabe destacar que, en la actualidad, se han desarrollado una gran variedad de métodos de selección de individuos, y no sólo, se han desarrollado avances en éste operador, sino también, en el cruce y en el mute. Todo esto, con la finalidad de producir individuos más aptos y en menor tiempo, evolucionar una población efectiva y eficiente.

3.4.3.2 Ventajas y desventajas del algoritmo genético

Optimizar tanto con variables continuas, como discretas, o ambas, es posible modelar problemas con incertidumbre o sin ella. Frecuentemente los factores de los problemas reales, son inciertos.

- Realizar una búsqueda exhaustiva, dentro del espacio de soluciones factibles. El espacio de soluciones está delimitado por las restricciones, y dentro de éstos límites, la búsqueda es realizada.

- No requerir de un conocimiento previo de técnicas de optimización, simplemente se requiere conocer la interacción del sistema que se desea optimizar.
- Tener la capacidad de optimizar más de un criterio, al mismo tiempo. En los problemas de la vida real, siempre al mejorar un criterio, uno se ve afectado. Éste tipo de optimización con GA's, se conoce como Algoritmo Genético Multiobjetivo (MOGA, por su acrónimo en inglés).
- Poder ser empleados, en cualquier problema de optimización, no importando la complejidad, ni el área (sistemas dinámicos no lineales, control, diseño, planificación, procesamiento de señales, optimización combinatoria).

Sí bien he cierto que los GA's, son poderosos al momento de resolver problemas, éstos son lentos. En éste tipo de situaciones, el uso de técnicas convencionales puede proveer una solución, en menor tiempo y con cierto grado de precisión, esto, debido a que las técnicas convencionales siguen un proceso de evolución –heurística -. Así mismo, el desarrollo de un GA, implica un alto coste computacional. Aunado a ello, la determinación de los parámetros (el tamaño de la población, los porcentajes de mute y cruce, el método de selección), no son una tarea fácil. Y finalmente, la solución que se encuentra -en la mayoría de los casos-, es sub-óptima, puesto que se le dificulta encontrar el óptimo global, debido a lo limitante del espacio de soluciones factibles, esto, derivado de las restricciones del caso bajo estudio.

CAPITULO 4 METODOLOGIA: DESARROLLO Y RESULTADOS.

4.1 Introducción

La OPEP espera que los inventarios petroleros caigan en aproximadamente 445 millones de barriles en 2021, el último panorama sobre oferta y demanda revisado en Marzo, demuestra que las restricciones al bombeo están reduciendo el exceso de suministro, consecuencia del desplomó económico mundial en 2020 al -3.4% que desencadenara un shock global sin precedentes por COVID-19. La industria petrolera en México ha sufrido fallas económicas por fluctuaciones de precios en los últimos años y alcanzó ventas históricas de USD -2.27 / barril en abril de 2020. Sin embargo, el problema del volumen de transporte por ductos aumentó considerablemente en 2019, generando variaciones de - 25.2% miles de barriles (TB), dentro del comercio exterior de hidrocarburos disminuyendo un -6,8% respecto a 2018, esto debido a una tendencia decreciente en todos los indicadores con respecto a años anteriores, como lo presenta la figura [E] de la Tabla 3. Los STO, son un medio de transporte versátil ante las necesidades geográficas, que a menudo se vuelve inestable derivado a perturbaciones operativas, vandalismo, cavitación y corrosión, esta última generando costos anuales para la industria del petróleo y el gas en los Estados Unidos por \$ 27 mil millones (según NACE International), lo que lleva a algunos a estimar que el costo anual global para la industria supera los \$ 60 mil millones.

Tabla 3

Volumen y exportación de transporte por oleoducto de 2015 a 2019.

Producto	Volumen de transporte por oleoducto (Miles de Barriles)					Variacion 2019/2018 (%)
	2015	2016	2017	2018	2019	
Petróleo crudo	387,674	383,344	298,238	255,418	245,977	-3.7
Gasolina	350,694	324,197	257,982	238,964	160,392	-32.9
Combustib le para aviones	20,627	19,816	13,329	11,595	8,599	-25.8
Diesel	120,602	111,620	83,450	78,783	37,920	-51.9
Gasolina	39,074	40,308	34,622	31,495	8,161	-74.1
Otros	4,078	27,767	18,079	20,085	14,731	-26.7
Total Anual	922,749	907,052	705,700	636,340	475,781	-25.2

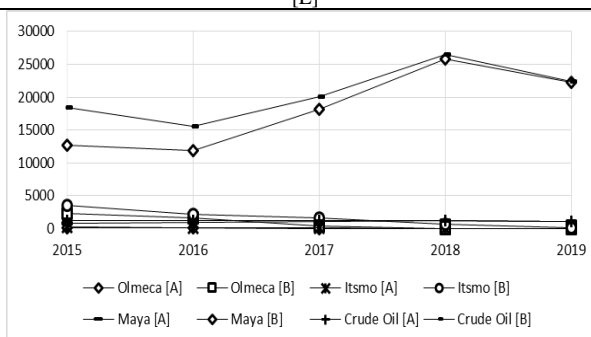
Comercio exterior de hidrocarburos (Miles de Barriles por Día) [A]
Exportaciones netas (Millones de dólares) [B]

	[A]	[B]	[A]	[B]	[A]	[B]	[A]	[B]	[A]	[B]	[A]	[B]
Aceite C.	1,172	18,471	1,194	15,582	1,174	20,047	1,184	26,541	1,103	22,403	-6.8	-15.6
Olmeca	124	2,333	108	1,569	19	358	-	-	-	-	-	-
Istmo	194	3,489	153	2,108	86	1,589	31	722	4	90	-86.7	-87.5
Maya	854	12,629	934	11,905	1,069	18,100	1,153	25,818	1,099	22,313	-4.7	-13.6
Exportacion		21,117		17,499		22,489		29,333		24,500		-16.5
Total Anual ^a		263		-2,377		-3,987		-3,355		-568		-83.1

Volumen de exportaciones de crudo por destino geográfico (Miles de Barriles por Día) [C]
Valor de las exportaciones de crudo por destino geográfico (Millones de dólares) [D]

	[C]	[D]	[C]	[D]	[C]	[D]	[C]	[D]	[C]	[D]	[C]	[D]
América	705	11,599	604	8,026	638	10,918	673	15,360	609	12,696	-9.5	-17.3
Europa	248	3,733	272	3,437	219	3,656	199	4,329	182	3,527	-8.7	-18.5
Asia	219	3,119	318	4,119	317	5,474	311	6,851	312	6,180	0.3	-9.8
Total	1,172	18,451	1,194	15,582	1,174	20,047	1,184	26,541	1,103	22,403	-6.8	-15.6

[E]



Abbreviations: a. Incluye condensados, gas natural seco, petróleo y petroquímicos. TB. Miles de barriles, TBD. Miles de Barriles por Día MD. Millones de dólares

4.2 Etapa 1: Revisión del estado del arte.

La revisión del estado del arte, comprende en analizar extensamente la bibliografía, con el objetivo de definir claramente los alcances del estudio, buscando definir los mismos de manera clara y consistente, identificando fallas, PCGC, perturbaciones e incertidumbres asociadas al funcionamiento del STO, mediante procedimientos operativos establecidos por la empresa, (Análisis estructurado de fallas & SCADA), para desarrollar un control adaptativo, que ejecute acciones en caso de existencias de fallas en el sistema, generadas por efectos de corrosión y sea capaz de reconfigurar los diversos escenarios de comportamiento (eficiencia/desempeño), respetando una estructura de funcionamiento centrada en confiabilidad. De manera conjunta desarrollar un SAE-STO, que comprenda la conjunción diferentes técnicas con el fin de realizar un análisis estructural del STO, mediante software especializado, capaz de examinar resultados, actividades y procesos significativos para establecer medidas correctivas en el sistema, aportando conocimiento a la ciencia, al desarrollo tecnológico y a la sociedad referente a factores generacionales de corrosión, en instalaciones petrolíferas Mexicanas, aplicable a campos internacionales.

Durante los últimos 30 años, importantes contribuciones sobre corrosión a ductos en la industria del petróleo y gas, han sido publicados. El presente documento tiene como objetivo construir una revisión de literatura sistemática (RLS), desde una perspectiva integradora, reconociendo diversos estudios en los periodos 1987-2020, analizando 259 documentos, desde tres enfoques previamente no abordados conjuntamente dentro del contexto de corrosión a sistemas de transporte por ductos (STD). Hallazgos sobre los temas de análisis, discusiones y líneas futuras de investigación se describen.

El alcance de nuestra SLR tiene como objetivo contribuir al estado del conocimiento de los procesos control y monitoreo del STD, analizando la modelación del fenómeno “Corrosión” y su impacto en la integridad mecánica del sistema desde una perspectiva integradora. Las preguntas de investigación (PI’s) se clasifican en la Tabla 4.

Tabla 4. Preguntas de investigación **Fuente:** *Elaboración propia*

ID	Question
PI-1	¿Cuál es el impacto de la corrosión en la integridad mecánica del STD?
PI-2	¿Por qué es importante analizar el comportamiento de la corrosión del STD?
PI-3	¿Cómo impacta un incorrecto sistema de control y monitoreo operativo en un STD?

4.2.1 Metodología: Revisión Literaria Sistemática (RLS)

El objetivo de este estudio es desarrollar una revisión sistemática de la literatura, basado en la síntesis de lo que ya es conocido y lo que no (Wee & Banister, 2016), que represente el valor agregado de una RLS en temas de corrosión a ductos en áreas o procesos específicos (gasoductos, oleoductos y poliductos). La inclusión de técnicas de inteligencia artificial (IA) como herramientas históricas en la modelación del fenómeno (Corrosión), teorías de control tolerantes a fallas y sistemas de monitoreo soportados de tecnología de geo localización (GPS), en la actualidad operan y resguardar la confiabilidad del STD en diversas partes del mundo. El estudio analiza diferentes enfoques de artículos científicos y revisiones bibliográficas de 1987 a 2020 con el fin de encontrar las ventajas de utilizar la teoría del control tolerante a fallas (CTF), inteligencia artificial (IA) y sistemas de geo localización (GPS) en la industria del petróleo y gas. Se utiliza la metodología definida por Tranfield, Denyer, & Smart (2003), la cual estructura tres fases: planificación, conducción y documentado.

4.2.2 Selección de los estudios y evaluación de la calidad.

El criterio de búsqueda se construyó mediante la combinación del operador 'and' y los términos clave: 'Corrosion (C)' and 'Pipeline Transport System in oil and gas industry (PTS)' and 'Mechanical Integrity (MI)' and 'Artificial Intelligence (IA)' and 'Fault-Tolerant Control Systems (FTCS)' and 'Geo location System (GPS)'.

Se incluyeron dos bases de datos de investigación en la búsqueda sistemática, Web of Science y SCOPUS, para recopilar artículos académicos y reseñas: (i) con estado publicado en revisión por pares en revistas desde enero de 1987 hasta diciembre de 2018; (ii) en idioma inglés; (iii) que comprenden los términos clave en el título, resumen y palabras clave. Actas de congresos, capítulos de libros, manuscritos inéditos y disertaciones las cuales no fueron incluidas. La aplicación de los criterios de búsqueda resultó en 1743 artículos en Mendeley y 824 papeles en Web of Science. Después de delimitar la búsqueda para el tipo de documento artículo (223), libro (17) y revisión (19), fueron clasificados respectivamente. La ejecución de los criterios de búsqueda muestra la recuperación de 259 estudios. Después de eliminar los duplicados, las referencias se ordenaron alfabéticamente por nombre del autor para evitar sesgos por año de publicación y por "relevancia". A continuación, los estudios se evalúan con las preguntas de evaluación de calidad (PEC's) en la Tabla 5.

Tabla 5. Preguntas de evaluación de la calidad. *Fuente: Elaboración propia*

Preguntas de Evaluación de la Calidad.	ID
¿Están claramente establecidos y bien explicados los factores que estructuran la corrosión y como estos impactan la integridad mecánica del STD?	PEC-1
¿Se identifican y explican de manera clara y suficiente, los métodos empleados para analizar el comportamiento de la corrosión del STD?	PEC-2
¿Se justifica claramente el funcionamiento y la dinámica adaptativa de trabajo de las tecnologías de monitoreo y control operativo empleadas en un STD, ante cualquier falla?	PEC-3

Las preguntas fueron determinadas para asegurar el ajuste entre la metodología de investigación y las PI's (D. C. Tranfield, Denyer, & Smart, 2003). En consecuencia, nuestro objetivo principal es cumplir los objetivos de las PI's con esta evaluación de calidad de criterios. Los criterios de calidad del estudio consideran el título y el resumen, de lo contrario el artículo no respondía a las PEC's, se rechazaba. Finalmente, se obtuvo una muestra de 259 documentos para la extracción de datos. La figura 10 muestra un resumen grafico de los temas de interés del estudio, considerando que la PI-2 es el tema más relevante de estudio en los STD en la industria del gas y petróleo.

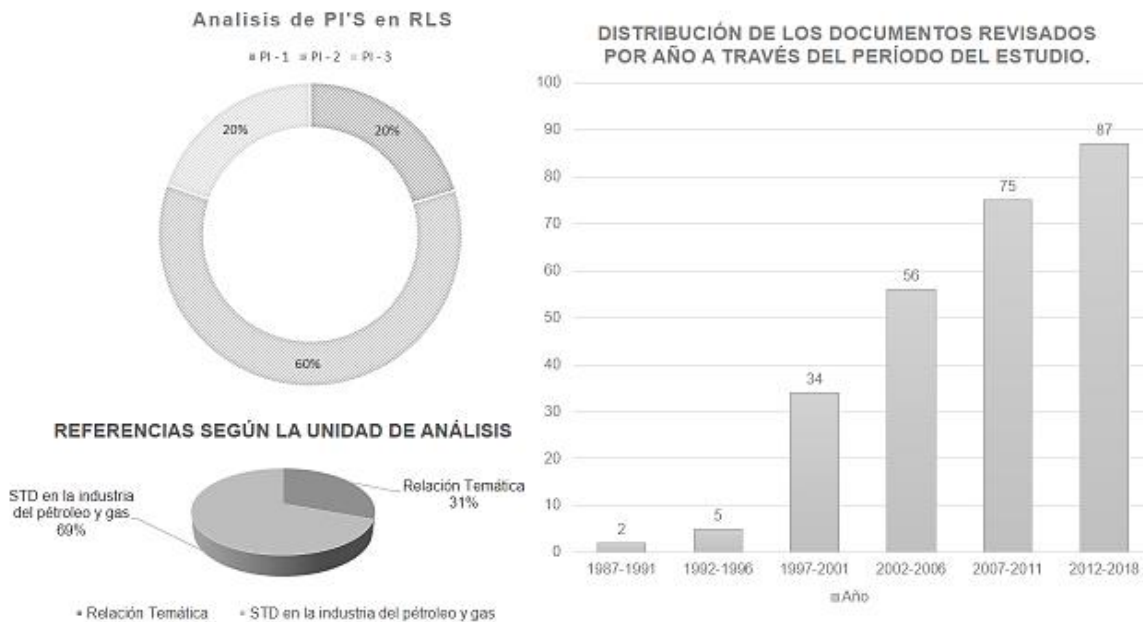


Figura 10. Análisis de los trabajos de estudio en RLS (PI's). *Fuente: Elaboración propia.*

4.2.3 Análisis y síntesis

Para cada uno de las PI's, se realizó el análisis a través del procedimiento deductivo para la definición del esquema de categoría, siguiendo la guía de [Mayring \(2015\)](#). El procedimiento deductivo desarrollo categorías a partir de consideraciones teóricas, con conceptos utilizados en procesos de operaciones para la dirección del material ([Mayring, 2015](#)).

La PI-1, analizo: *Corrosión dulce "CO₂", Corrosión acida "H₂S", Corrosión con oxígeno "O₂", Corrosión galvánica y Corrosión microbológica "MIC"*. La Corrosión dulce se genera cuando el dióxido de carbono se disuelve en presencia de una fase acuosa, formando ácido carbónico, considerado corrosivo en el acero al carbón ([López, Schreiner, de Sánchez, & Simison, 2003](#)). La Corrosión acida, considero el contenido de ácidos orgánicos con estructuras anulares saturadas, con uno o más grupos carboxílicos en los aceites crudos ([Turnbull, Slavcheva, & Shone, 1998](#)).

La corrosión relacionada con el oxígeno en los ambientes de producción de petróleo y gas a menudo es mucho más agresiva que la corrosión provocada por el CO₂ o el H₂S, a diferencia de la corrosión galvánica, la cual es un proceso electroquímico asociado con el movimiento de los electrones entre áreas que poseen potenciales electroquímicos diferentes (Mackay, Jackson, Melot, Scheie, & Vittonato, 2016), la información anterior se muestra en la figura 11. La corrosión microbiológica es generada por microorganismos planctónicos en lugar de sésiles de las biopelículas, en los aceros al carbón (R. B. Eckert, 2015).

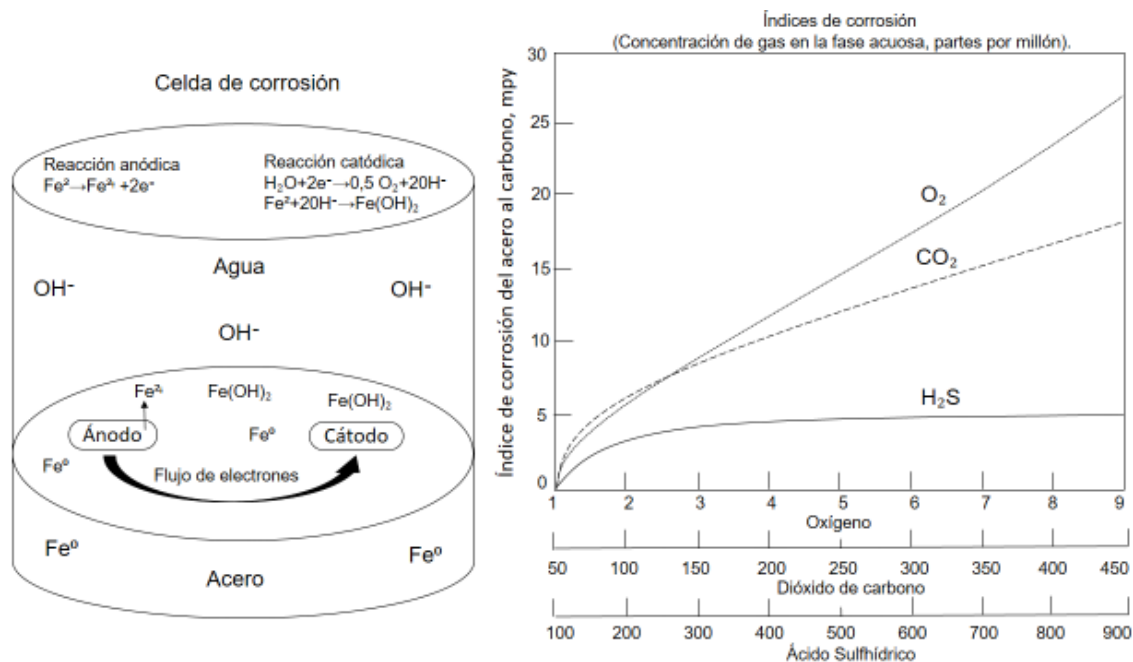


Figura 11. Celda de corrosión (Corrosión Galvánica) & Índices de corrosión relativos en milipulgadas/año (mpy) del acero al carbono. **Fuente:** (Mackay et al., 2016)

La PI-2 analizo: Los primeros modelos desarrollados para analizar el comportamiento de la corrosión en los STD y los modelos soportados de herramientas inteligentes: Artificial *neural network* "ANN", Fuzzy logic "FL", Bayesian network "BN", Genetic algorithm "AG" y Simulation monte carlo "SMC".

La industria del petróleo y el gas ha estado a la vanguardia de la tecnología desde sus principios, menciona (Braswell, 2013) "La industria entró en el campo de la IA al principio del juego y hoy la IA, se aplica en todo el mundo." Las redes neuronales artificiales, son un

paradigma del procesamiento de información inspirado en la forma en que los sistemas nerviosos biológicos, como el cerebro, procesan información (Cao, Zhu, Zhang, & Hou, 2010). La lógica difusa, permite la incorporación del conocimiento experto, para el razonamiento del problema donde un enfoque determinista no es viable, debido a la escasez de datos, variabilidad o imprecisiones del conocimiento experto (Biezma, Agudo, & Barron, 2018). Las redes bayesianas, son capaces de tratar con interacciones de factores multivariadas o que tienen una interdependencia compleja, mediante ecuaciones matemáticas, lógicas o reglas bayesianas (Taleb-Berrouane, Khan, Hawboldt, Eckert, & Skovhus, 2018). Los algoritmos genéticos, manipulan conceptos derivados de la biología y se basan filosóficamente en la teoría de la supervivencia de Darwin “*el más apto*” (Canyurt & Ozturk, 2008). La simulación monte Carlo, representa una alternativa para los métodos analíticos, apta para determinar los parámetros de la distribución de salida, basada en valores generados aleatoriamente a partir de distribuciones de entrada conocidas (Shabarchin & Tesfamariam, 2017). La metodología funcional de la información anterior se muestra en la figura 12.

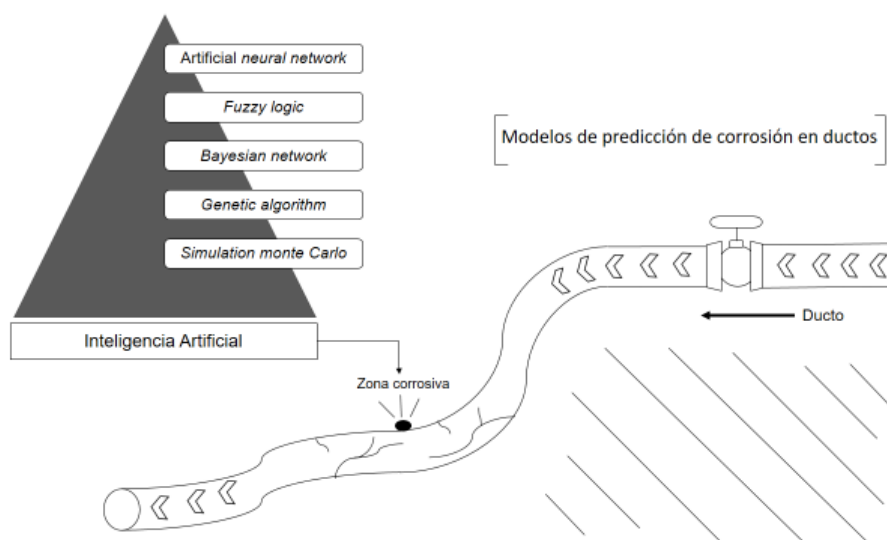


Figura 12. Modelos inteligentes para predicción de corrosión en STD

Fuente: *Elaboración propia.*

La PI-3 analizo: el funcionamiento de las teorías de control operativas vigentes en los STD, contra las capacidades adaptativas que ofrece el control tolerante a fallas, estimado por los autores como alternativa de solución, así como desarrollos en tecnología GPS, para identificar zonas de afectación y vandalismo en los STD.

Las tecnologías de mapeo como el GPS, realizan coordenadas de las ubicaciones cada segundo mediante procesamiento de datos transferibles a computadoras, para crear archivos de salida que pueden ser utilizados para análisis gráficos o estadísticos (Shen & Stopher, 2014). Desde el punto de vista de la teoría de sistemas, el control tolerante a fallas, trata de la interacción entre un sistema dado (proceso) y su control, considerando la capacidad de un sistema de control para mantener los objetivos de control a pesar de la aparición de la falla, admitiéndose una cierta degradación de sus prestaciones en una determina región de comportamiento como se muestra en la figura 13 (Puig, Quevedo, Escobet, Morcego, & Ocampo, 2004b).

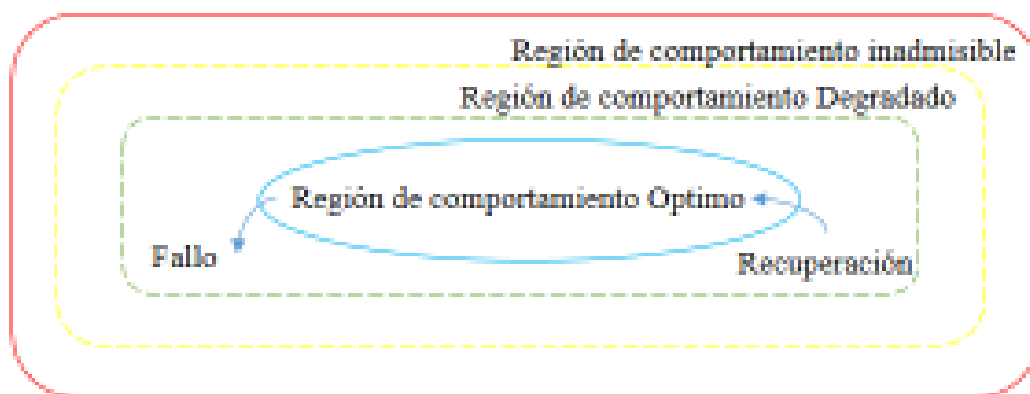


Figura 13. Regiones de comportamiento del CTF. **Fuente:** (Puig et al., 2004b).

4.2.4 Discusión y conclusiones de la Revisión Literaria Sistemática (RLS)

La revisión literaria sistemática (RLS), permitió evidenciar la brecha del conocimiento entre lo existente y las nuevas necesidades científicas y tecnológicas a nivel mundial en la industria del petróleo y gas. Analizando los efectos de la corrosión dulce (CO_2), ácida (H_2S), por oxígeno (O_2), galvánica y microbiológica (MIC), en la integridad mecánica de los STD y áreas de relación con el tema, considerando las clases generalizadas de corrosión cuando

aparecen de manera general o uniforme, por efectos de protección catódica, erosión, grietas o fisuras, picaduras, intergranular, tensocorrosión o fatiga del material, así como la implementación de nuevos inhibidores, diseños y materiales en los STD (Mesquita, Chauveau, Mantel, Bouvier, & Koschel, 2014; Patchigolla & Oakey, 2013), como alternativas para luchar contra este fenómeno. El uso de modelos lineales para analizar el comportamiento de la corrosión (de Waard, Lotz, & Dugstad, 1995; de Waard, Lotz, & Milliams, 1991), delimita su funcionamiento ante la presencia de variabilidad, a diferencia de los modelos con herramientas inteligentes (Braswell, 2013; Lopes, Nikhalat-Jahromi, & Jorge, 2016; Mohaghegh, Al-Fattah, & Popa, 2011), impulsando el futuro en los modelos híbridos multidisciplinarios combinados con estudios de ultrasonido, radiografías o equipos de simulación 3D (Nicola, Carreto, Mentzer, & Mannan, 2013), con la mecánica de fractura, herramientas químicas, electrónicas o computacionales, para modelar adecuadamente su comportamiento y mitigar su afectación.

El impacto de los sistemas de control y el monitoreo operativo en un STD, se basa en el funcionamiento de las teorías de control operativo vigentes, frente a las capacidades adaptativas que ofrece actualmente el CTF (Costa Castelló, Puig, & Blesa, 2016), en la industria del petróleo y el gas, como una herramienta alternativa a los problemas operativos dentro de los escenarios de falla, el uso de los GPS, como sistemas de monitoreo a ductos, considerando la constante evolución tecnológica de sensores, actuadores, controladores y redes, así como la inducción de la robótica (Shukla & Karki, 2016), al propiciar futuras áreas de estudio, el uso de inhibidores de corrosión, clasificados como secuestradores, agentes reactivos, fases de vapor y formadores de películas como herramientas actuales para el control del fenómeno, así como el avance de nano partículas y nano estructuras como agentes de control de corrosión, que demuestran permeabilidad a los efectos de corrosión (Mackay et al., 2016).

El objetivo del estudio fue construir un estado de conocimiento basado en la síntesis de las preguntas de investigación (PI's), analizando diversos temas de interés mundial en la industria del petróleo y gas, con la finalidad fundamental e identificar las mejores alternativas, que garanticen el éxito de una metodología, para desarrollar dos modelos

híbridos multidisciplinarios. El primero identificando mediante un algoritmo patrones generacionales de corrosión y el segundo desarrollando un análisis estructural robusto de un STO, deteriorado y vandalizado en México (**SMT-PCGC & SAE-STO**), mediante técnicas de Control e Inteligencia Artificial que permitirán deducir o reconfigurar el funcionamiento del sistema establecido (condiciones operativas, perturbaciones corrosivas, puntos críticos en el sistema y modelación de escenarios de riesgo.), sustentado por la integración datos de campo, laboratorio, histórico y experticia, para unificar criterios de decisión, capaz de minimizar costos de mantenimiento y salvaguardar la vida en la periferia del STO, lo que permitirá obtener esquemas de trabajo, que lleven a acciones de adaptación y confiabilidad a la industria petrolera en México, aplicable a campos internacionales considerando ser un importante aporte al estado del arte vigente.

4.3 Etapa 2: Definición de los alcances de la Investigación.

El objetivo principal del estudio es la razón por la cual se desarrolla el SMT – PCGC & SAE – STO. El objetivo debe estar claramente definido desde el principio, ya que tiene una fuerte influencia sobre las siguientes etapas ([Sonnemann, Castells, & Schuhmacher, 2004](#)). El SMT – PCGC & SAE – STO, se orientan a diferentes objetivos: como modelar y evaluar el comportamiento generativo de la corrosión bajo diversas condiciones, identificando fallas, perturbaciones e incertidumbres asociadas al funcionamiento del STO, analizando posibles casos de reconfiguración que puedan ser llevados a cabo en el sistema, bajo protocolos que garanticen la estabilidad operativa del STO en condiciones adversas de trabajo.

Los alcances del estudio, enfatizan en garantizar la estabilidad operativa del STO, bajo esquemas de trabajo representados por toda la cadena de transporte de mezclas de hidrocarburo subterráneas y marítimas de la zona sureste de México, administrando y enviando el producto (*barriles como unidad funcional*), mediante sus estaciones de bombeo hacia su terminal de almacenamiento y transformación, sin atentar con la vida a su alrededor. Este proyecto será validado en el centro de distribución del STO, con sede en Ciudad Mendoza, Veracruz, México, ([Pemex, 2020](#)).

Los límites del sistema, es la selección de los elementos del sistema físico a modelar, dependiente de la definición del objetivo y el alcance del estudio (ISO, 1998). Las etapas, procesos y flujos que deben tomarse en cuenta para los límites del sistema son los siguientes (Roy et al., 2009):

- Confiabilidad del monitoreo y control del sistema, sin actualizaciones continuas de las fuentes de información.
- Entradas y salidas emergentes en la fase principal del transporte de hidrocarburo.
- Mitigación de índices vandálicos en zonas críticas del STO.
- Disposición de residuos del proceso, por efectos de vandalismo o derrame de hidrocarburo.
- Recuperación del hidrocarburo vandalizado o derramado (incluyendo la reutilización, el reciclaje y la recuperación de energía).
- Transporte de productos secundarios.
- Producción, transformación y uso de la mezcla de hidrocarburo.
- Utilización y productos de venta.

El SMT a PCGC, diseñado en este proyecto de investigación propone una metodología con las capacidades de adaptación dinámicas ofrecidas por el control tolerante a fallas (Puig, Quevedo, Escobet, Morcego, & Ocampo, 2004a; Puig et al., 2004b), mediante un sistema de adquisición remota de datos (SCADA) (Shafeek, Gadelmawla, Abdel-shafy, & Elewa, 2004), técnicas de inteligencia artificial (IA) (Bassam & Hernandez, 2009; Hernández, Nesic, Weckman, & Ghai, 2005; Deden Supriyatman, Sumarni, Sidarto, & Suratman, 2012) estructurado por subsistemas y escenarios de fallo, soportado de observadores virtuales y algoritmos de diagnóstico para fallas en ductos (“Algoritmos de diagnóstico para fallas en ductos,” 2014; Costa Castelló et al., 2016) que analizan el comportamiento evolutivo de la corrosión dulce (CO₂), que se genera cuando la mezcla de hidrocarburo contiene fases acuosas (López et al., 2003), ácida (H₂S), potencializada por el suelo donde este enterrada la tubería (Turnbull et al., 1998), oxígeno (O₂), en procedimientos de transporte bajo de

petróleo (Mackay et al., 2016), galvánica (GC), asociada con los sistemas de protección anticorrosiva (Mackay et al., 2016). microbiológica (MIC), generada por microorganismos planctónicos que contiene el petróleo (Richard B. Eckert & Skovhus, 2016).

Los factores más importantes, para comprender las diferencias entre los modelos de predicción de corrosión que se muestran en la revisión del estado del arte contra el SMT a PCGC, son metodologías para cálculos de Ph (Pots & Kapusta, 2005), el valor al estudio de los suelos para determinar su agresividad corrosiva (de Waard et al., 1995, 1991), el emplear equipos de flujo ultrasónico de inspección para analizar la integridad mecánica de la tubería (Kishawy & Gabbar, 2010), la conjunción de procedimientos metalográficos de laboratorio así como ensayos de tracción mecánica para determinar una caracterización confiable del material bajo normativas internacionales (Angel & Toquiantzi Butrón, 2008; “API | Estándares,” 2017; ASTM, 2011; Casanova-del-Angel & Córdova-Castillo, 2018).

La evaluación y los resultados de los diferentes modelos de predicción de corrosión analizados en la literatura (Pots & Kapusta, 2005; Rammay & Al-Nuaim, 2015; D. Supriyatman, Sumarni, Sidarto, & Suratman, 2012b), contra datos de campo reales han demostrado que puede variar considerablemente, y no es posible declarar qué modelo es mejor que otro (El-Abbasy, Senouci, Zayed, Parvizsedghy, & Mirahadi, 2016), lo que es posible afirmar, es la tendencia de modelos de predicción de corrosión, con el apoyo de herramientas inteligentes capaces de adaptarse a la dinámica del problema. Se considera agregar al SMT a PCGC, variables como la temperatura a la que está sujeto el ducto (Zheng, Kang, Meng, Shou-yong, & Xia, 2011), inhibidores (Duda, Govea-Rueda, Galicia, Beltraén, & Zamudio-Rivera, 2005; Migahed, Abd-el-raouf, Al-sabagh, & Abd-el-bary, 2005), sistemas aéreos no tripulados para monitoreo (Abayomi, Ayo, & Omowunmi, 2016; Lioliou & Ramirez, 2016), flujos multifacéticos, química del agua, entre otras que influyen directamente en la propagación de la corrosión.

4.4 Etapa 3: Identificación de fallas, PCGC, perturbaciones e incertidumbres asociadas al funcionamiento del STO.

La detección de fallas, perturbaciones e incertidumbres asociadas al funcionamiento de un sistema complejo, pone en evidencia la capacidad de análisis de cualquier equipo de trabajo en la actualidad, para determinar alternativas de mejora. La obtención de los datos cualitativos/cuantitativos y los procedimientos operativos establecidos del STO, permiten determinar un modelo analítico, que clasificado por subsistemas identificaran variables y factores inciertos que intervienen en el sistema.

El primer subsistema (Programa & Instrumentación operativa del STO), determina la interacción estructurada de fallas que pueden generar los equipos dinámicos, válvulas, sensores, la falta de comunicación entre estaciones de bombeo, las problemáticas al exceder la MAOP (Máxima presión segura para una tubería con indicaciones de pérdida de metal), así como la generación de fugas o derrames de hidrocarburo por fatigas del material.

El segundo subsistema (Sistema de Protección Anticorrosiva), determina la interacción estructurada de fallas que pueden generar los rectificadores de voltaje, la variabilidad de potenciales y puentes eléctricos en un sistema de protección catódica, fallas en ánodos, cátodos, conexiones y conductores en mal estado, así como la agresividad corrosiva del suelo (pH), para propagar patrones generacionales de corrosión y deteriorar el recubrimiento mecánico de la tubería.

El tercer subsistema (Integridad Mecánica), mediante Ultrasonic Intelligente Pigging Inspection, determina las fallas por afectación corrosiva interna y externa en la tubería, por indicaciones de pérdida de metal, agrietamiento y fracturas que establecen factores estimados de reparación en el sistema.

El cuarto subsistema (Análisis Metalográfico), determina las fallas generadas por exceder los límites de diseño de la tubería, alteraciones micro estructurales, propiedades físicas, químicas y micro geométricas, que provoquen la fatiga o ruptura prematura del material, mediante pruebas de laboratorio estandarizadas internacionalmente. La interacción de los subsistemas con el sistema principal (STO), se ilustra a continuación en la figura 14.

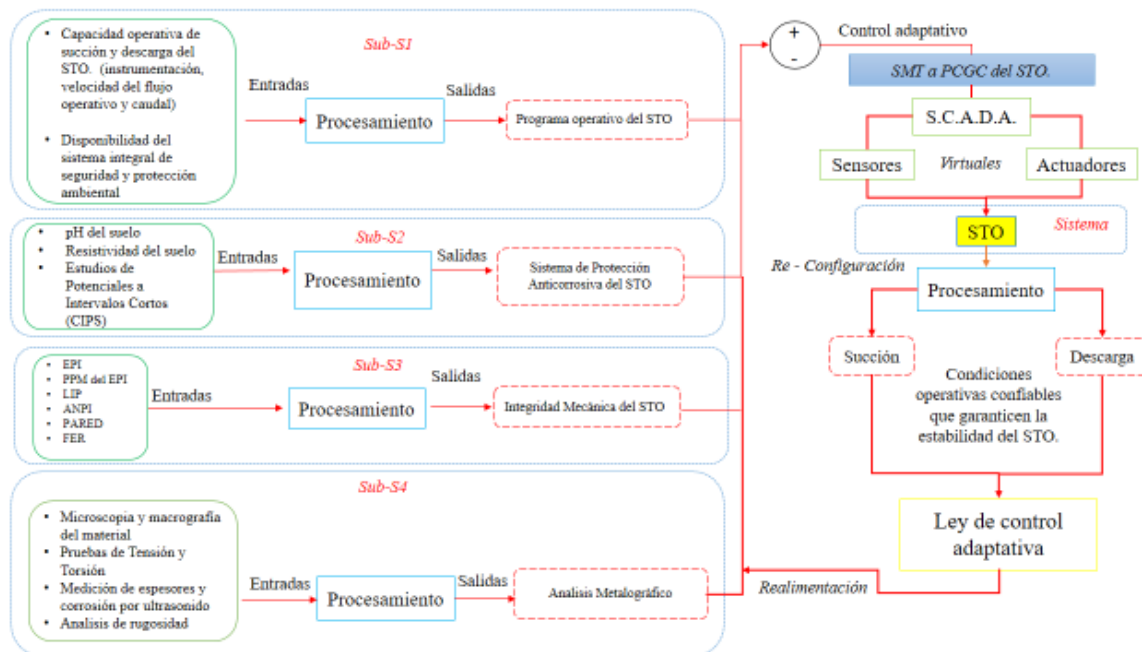


Figura 14. Interacción del SMT a PCGC con el STO. *Fuente: Elaboración propia, 2020.*

4.5 Etapa:4 Desarrollo del SMT a PCGC.

Desde la perspectiva de la teoría de sistemas, el control tolerante a fallas trata de la interacción entre un sistema (proceso) y su control. Un sistema de control es una interconexión de componentes que forman una configuración del sistema que proporcionara una respuesta deseada (Dorf & Bishop, 2005). La solución al problema de control, radica en considerar la incertidumbre en el modelo, se puede plantear estableciendo una estructura con parámetros desconocidos y pertenecientes a un conjunto de parámetros, aplicando técnicas de control robusto o adaptativo.

Existen dos enfoques del control tolerante: **Pasivo** (basado en diseñar una única ley de control que sea capaz de alcanzar sus objetivos tanto en situación de funcionamiento normal como en fallo) y **Activo** (basado en diseñar una ley de control diferente en función del estado del sistema (Normal o en fallo) a partir de la estimación de las restricciones y parámetros del sistema proporcionados por el diagnosticador) (Puig et al., 2004a). El control tolerante mediante el enfoque activo considera dos formas: La acomodación del fallo, o bien mediante la reconfiguración. El funcionamiento del sistema retroalimentado [A] y las etapas de una metodología sistemática para el diseño del control tolerante a fallas (CTF) [B], se ilustran en la figura 15.

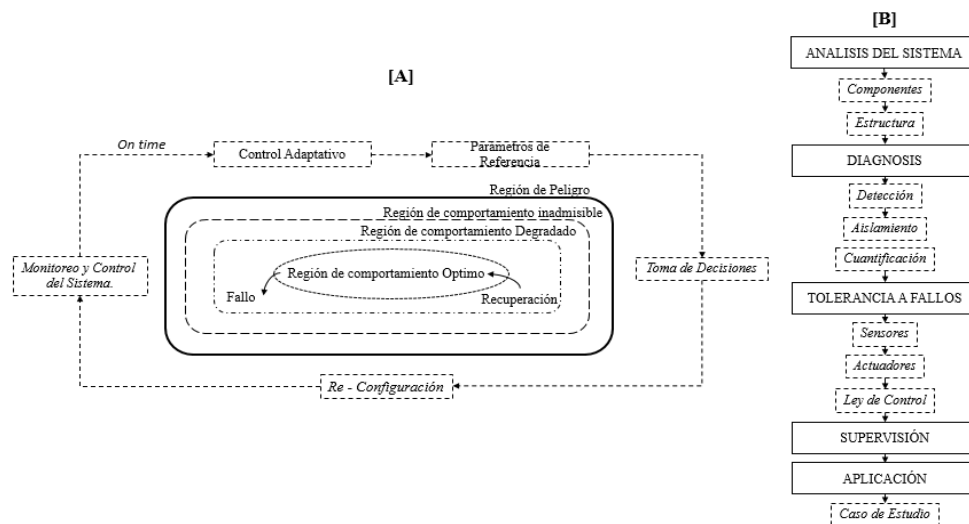


Figura 15. Regiones de comportamiento & Metodología del CTF. **Fuente:** Basado en (Blanke, Christian Frei, Kraus, Ron Patton, & Staroswiecki, 2000).

Las etapas del CTF se presentan a continuación:

- 1) **Análisis del sistema:** Estudia los componentes mediante un análisis de propagación de fallos a través de todos los subsistemas más relevantes, así como una evaluación de severidad de los mismos y a nivel estructural la redundancia presente en el sistema que soportara el diseño del sistema de diagnóstico y reposición.
- 2) **Diseño del sistema de Diagnóstico:** Parte del análisis estructural, mediciones y fallos a diagnosticar, el sistema de diagnóstico de fallos deberá no sólo detectar y aislar los fallos sino también estimar su tamaño (Cuantificación).

- 3) **Diseño de mecanismos de tolerancia:** Para los fallos considerados según se trate las condiciones en sensores, actuadores y/o planta.
- 4) **Diseño del Supervisor:** Los datos acerca de los fallos proporcionados por el sistema de diagnóstico, el supervisor deberá activar los mecanismos de tolerancia que se han diseñado para cada uno de ellos.
- 5) **Aplicación y test:** En simulación y sobre el sistema real (Puig et al., 2004a).

4.5.1 Análisis del Sistema.

La ingeniería de control se basa en los fundamentos de la teoría de retroalimentación y el análisis de sistemas lineales, e integra los conceptos de teorías de redes y de comunicación. Un sistema de control es una interconexión de componentes que forman una configuración del sistema que proporcionara una respuesta deseada (Dorf & Bishop, 2005). El comportamiento del STO, establece la interacción de diversas variables de entrada, que alimentan al proceso de transporte de hidrocarburos en territorio nacional, con el fin de satisfacer la demanda operativa diaria establecida por la empresa. A continuación, se representa en la figura 16, el proceso de interacción grafica de los sub sistemas con el sistema principal (STO), con el fin de identificar y trabajar con cada fuente de información.

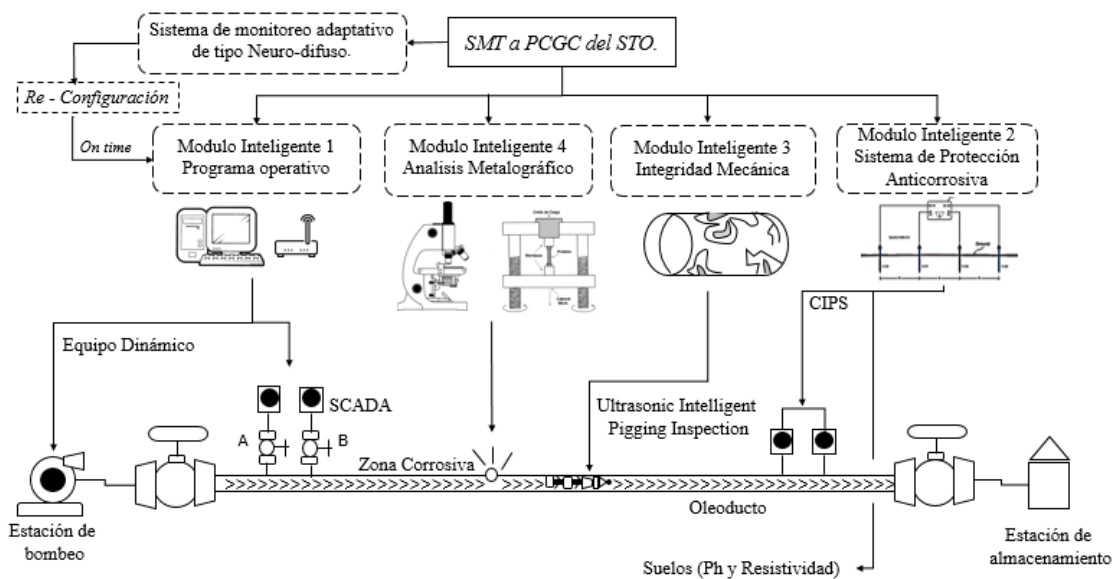


Figura 16. Estructura grafica del SMT a PCGC *Fuente: Elaboración propia, 2020.*

4.5.1.1 Subsistema 1 - Programa & Instrumentación Operativa del STO (SCADA).

La industria mexicana del gas y el petróleo establece su estrategia para comercializar el petróleo y los productos petroquímicos, bajo la oferta y demanda internacional. La red del STO, tiene una longitud operativa de más de 17,000 km (que consta de 48 tuberías, 78 tuberías de gas, 11 tuberías de polietileno y cuatro tuberías de petróleo y gas) para el transporte de hidrocarburos, petróleo y productos petroquímicos con una garantía de suministro oportuno (Pemex, 2020). La diversidad de mezclas de petróleo crudo en México, acompleja su proceso de transporte debido a sus características, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6.

Propiedades Físico-Químicas de los Crudos Mexicanos. Fuente: (Pemex, 2020).

TIPOS DE PETROLEO CRUDO	GRAVEDAD (°API)	AZUFRE (% PESO)	AGUA Y SEDIMENTO (% EN VOL.)	PRESION DE VAPOR REID (LB/PULG2)	CONTENIDO DE SAL (LB/MB)	NIQUEL ppm	VANADIO ppm	ASFALTENOS % PESO	NUMERO DE NEUTRALIZACION mg KOH/g
	Mínimo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo
> MAYA	21.0	3.6	0.5	6.50	50.00	54	270	10.6	0.28
> ISTMO	32.0	1.6	0.5	6.50	50.00	8	50	1.2	0.21
> OLMECA	38.0	1.0	0.5	6.50	50.00	2	9	0.58	0.10
> NARANJOS	26.0	3.0	0.5	6.50	50.00	29	121	10.60	0.36
> ALAMO	24.0	3.2	0.5	6.50	50.00	39	161	13.05	0.15
> MURO	18.5	4.0	0.5	6.50	50.00	60	289	18.46	0.13
> HORCON	22.0	3.2	0.5	6.50	50.00	44	211	15.54	0.19
> MARFOANTARES	25.0	3.0	0.5	6.50	50.00	45	157	14.76	0.27
> POZOLEO	29.0	2.0	0.5	6.50	50.00	15	52	2.95	0.26
> PAPALOAPAN	41.0	2.0	0.5	6.50	50.00	22	33	4.59	0.07
> ARENQUE	32.0	2.5	0.5	6.50	50.00	16	79	6.52	0.18
> TAMAULIPAS ALTAMIRA	17.5	5.5	1.0	6.50	50.00	51	211	17.73	0.41
> PANUCO CACALILAO	11.9	5.5	1.0	6.50	50.00	69	318	12.45	0.03

El caso de estudio se desarrolla en el centro de distribución del STO, con sede en Ciudad Mendoza, Veracruz, México, con un programa operativo de 140 a 220 miles de barriles por día (MBD) (Pemex, 2020). El envío de hidrocarburos se realiza a través de tuberías de 24 "Ø y 30" Ø, con una longitud de 572 km. El proceso se lleva a cabo con un sistema secuencial de bombeo de hidrocarburos, que permite el flujo del producto, impulsado por 6 estaciones, asistidas por telemetría y un sistema de supervisión, adquisición y control de datos (SCADA).

El centro de distribución presenta 96 válvulas de seccionamiento de línea, 17 válvulas de retención, 28 trampas de diablos y equipo de instrumentación remota. La capacidad operativa del centro de distribución se muestra en la tabla 7.

Tabla 7

Programa operativo establecido. **Fuente:** (Pemex, 2020).

Parámetros (Kg/cm ²)	E-2	E-3	E-4	E-5A	E-5	E-6
Máxima presión operativa	53	66	79	55	74	63
Alarma alta presión en descarga	54	67	80	56	75	64
Disparo alta presión en descarga	54.5	67.5	80.5	63	75.5	64.5
Disparo de válvula de alivio en d.	55	68	81	63.5	76	65
Alarma baja presión de succión	6	6	6	14	5.5	6
Disparo baja presión de succión	4	4	4	12	4	4
Numero de equipos dinamicos	6	6	7	4	7	7
Potencia instalada (HP)	30,000	30,000	35,000	20,000	35,000	35,000

El proceso inicia con el recibo del hidrocarburo proveniente de la estación de bombeo (E-1) en Nuevo Teapa, Veracruz (KM 0), recibe y envía de manera secuencial la (E-2) situada en loma bonita, Oaxaca (Km 166), (E-3) en Arroyo Moreno, Veracruz (Km 277), (E-4) en Zapoapita, Veracruz (Km 317), (E-5A) en Ciudad Mendoza, Veracruz (Km 351) considerada una estación de potencia debido el perfil topográfico de la zona, (E-5) en Maltrata, Veracruz (Km 362), (E-6) en San Martín Texmelucan, Puebla (Km 488), que finaliza el proceso de bombeo del centro de distribución con la (E-7) en Venta de Carpio, Estado de México (Km 572). En este punto, el hidrocarburo transfiere a procesos de transformación, se vende y comercializa a nivel nacional e internacional. El centro de distribución Mendoza (CDM), requiere estabilizar la confiabilidad operativa del STO, con el fin de evitar efectos de ariete y cavitación en un sistema deteriorado mecánicamente, bajo un perfil topográfico complejo. En la figura 17, se presenta el perfil topográfico e hidráulico para un ritmo de bombeo de 150 MBD, en una línea de 24 "Ø transportando crudo MAYA, con una viscosidad constante de 21°API y una gravedad específica de 0.88 Km/m³, considerando límites operativos y la ubicación de las principales instalaciones a nivel del mar.

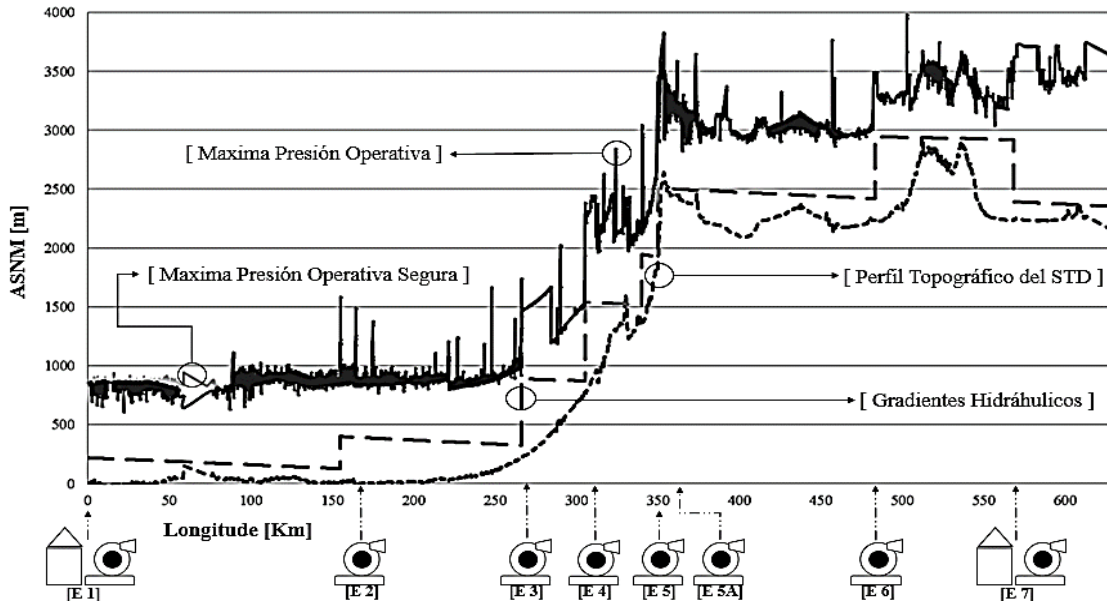


Figura 17. Perfil topográfico e hidráulico del centro de distribución. *Fuente:* (Pemex, 2020).

La figura 18, representa la estrategia funcional de una estación de re-bombeo de productos de la compañía, conformadas por equipo de medición, filtrado y recuperación.

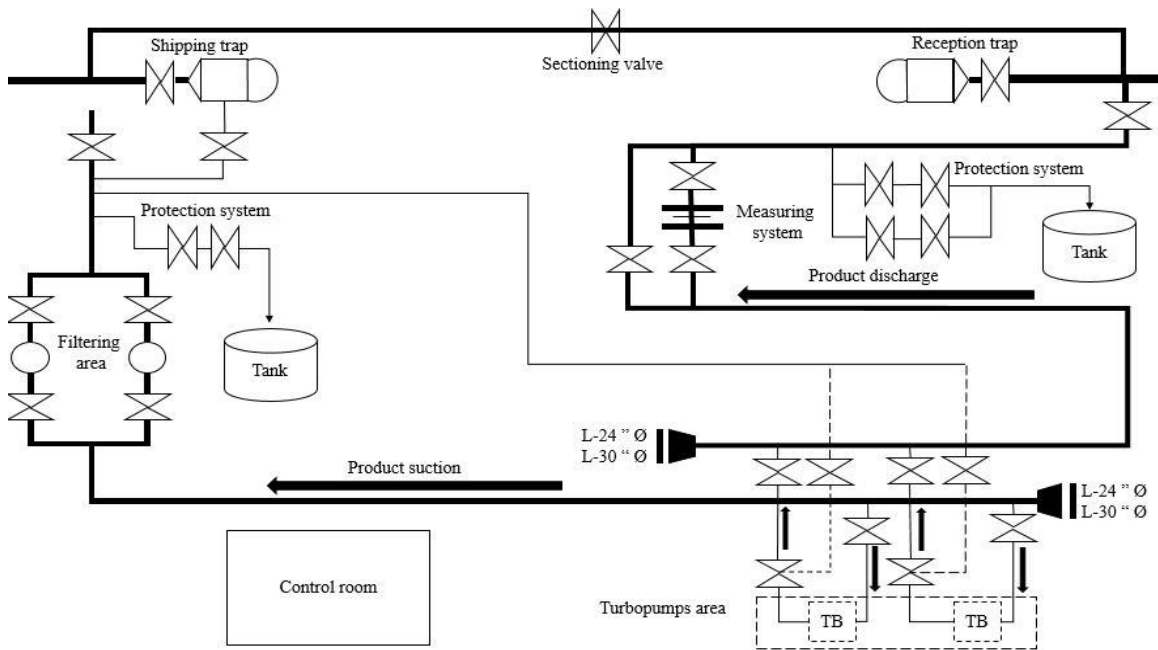


Figura 18. Funcionamiento operacional del STO. *Fuente:* (Pemex, 2020).

El sistema de confiabilidad operativa (ORS) de la compañía considera metodologías de confiabilidad al personal, procesos, equipos y mantenimientos, soportado por sistemas informáticos de gestión y protección del medio ambiente (Pemex, 2016b). El CDM atiende las contingencias por robo de hidrocarburo de los estados (Puebla y Veracruz), con 1403 tomas clandestinas con un promedio de frecuencia, cada 5 horas con 13 minutos y 799 cada 8 horas con 13 minutos, respectivamente (Petroleos Mexicanos, 2020). La figura 19 muestra la tendencia del robo de hidrocarburo de la zona y a nivel nacional, se destaca que, por efectos de longitud y manejo de información del artículo, se presenta solo una sección del STO, que comprende una longitud de 90 km de las zonas de Veracruz y Puebla de la E-5 a E-6, el cual, por perfil topográfico y fluencia de robo de hidrocarburo, es un punto crítico.

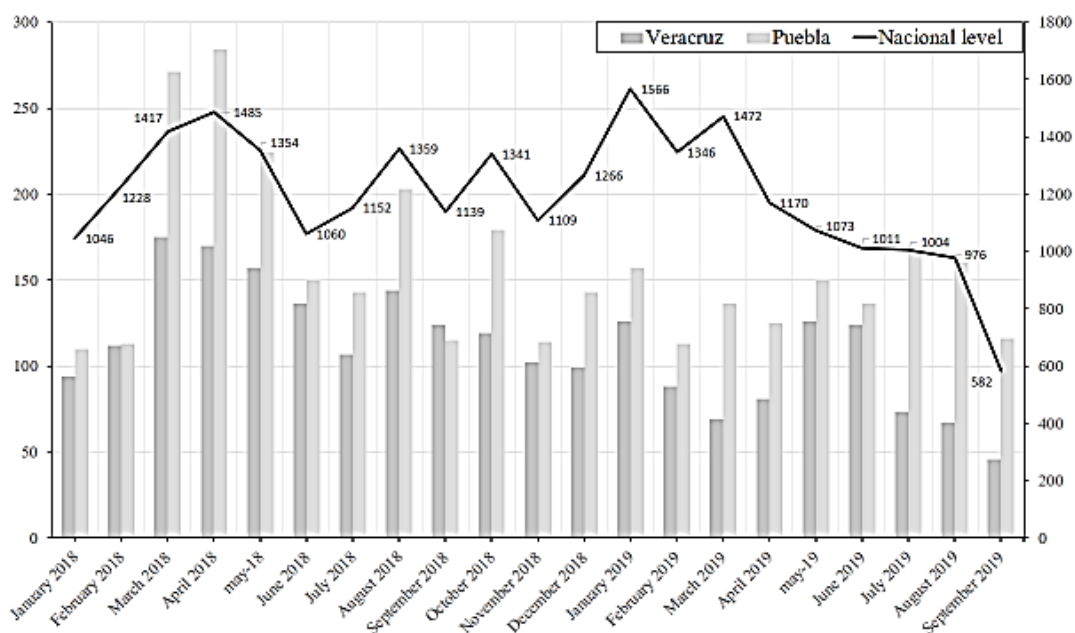


Figura 19. Reporte de robo de hidrocarburo de enero del 2018 a septiembre del 2019.

Fuente: (Petroleos Mexicanos, 2020).

4.5.1.2 Subsistema 2 - Sistema de Protección Anticorrosiva (SPA).

Hace referencia al proyecto de rehabilitación integral al sistema de protección anticorrosiva, desarrollado en el CDM, en el Oleoducto 24” – 30” Ø (pulgadas de diámetro) de (E-1) en Nuevo Teapa – (E-7) Venta de Carpio, atendiendo una longitud de 530 km.(Dtsi, 2016).

Los sistemas de protección anticorrosiva (SPA), son herramientas de gran utilidad para controlar la corrosión galvánica de una superficie metálica. Se desarrollan estudios de CIPS (Close Interval Potential Survey), DCVG (Gradiente de voltaje en corriente directa), localización y retiro de puentes eléctricos con equipo PCM (pipeline current mapper), evaluación de las condiciones del recubrimiento mecánico del ducto así como análisis del pH (Potencial de hidrogeno) y resistividad del suelo de manera longitudinal en el trazo del derecho de vía (DDV) del STO.

El conocimiento de dichos parámetros permitirá determinar un perfil del DDV, que especifique la agresividad corrosiva del suelo. El suelo es por mucho el electrolito más complejo de todos, debido a que sus características están determinadas por su contenido variable de humedad, aireación, permeabilidad, pH, sales, resistividad y materia orgánica en descomposición, mismas que influyen en la determinación del grado de corrosividad a la que estarán expuestos los metales que se encuentren enterrados o sumergidos a dicho medio. Las pruebas que deben realizarse para evaluar el nivel de agresividad corrosiva del suelo, incluyen la medición del pH, medidas de cloruros, sulfatos, resistividad total, acidez total y potenciales Redox.

La lectura de pH se refiere a la concentración de iones de hidrógeno activos (H^+) que se da en la interface líquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. En lo que se refiere a la acidez, los suelos muy ácidos ($pH < 5.5$) pueden motivar una rápida corrosión del metal desnudo, y la agresividad del suelo aumenta con incremento de la acidez (disminución del pH), pero estos valores de pH no son normales. La mayor parte de los suelos tienen pH comprendidos entre 4.0 y 8.0, en una cierta correlación entre conductividad y agresividad ([Mecanz, 2016](#)).

La resistividad del suelo es la propiedad de un material que define su resistencia al flujo de una carga eléctrica, a través de la medición de esta propiedad, es posible determinar la agresividad corrosiva del electrolito por efectos electroquímicos propios del medio ambiente.

La resistividad en los suelos depende, en particular, de su estructura, de las dimensiones de las partículas que lo constituyen, la porosidad y permeabilidad, del contenido de agua (humedad) y de su contenido de iones. Por tanto, la resistividad de un terreno y especialmente la de los estratos superiores, puede variar notablemente con las estaciones del año, la precipitación pluvial, la actividad agrícola e industrial, etcétera. Para efectos de la investigación, el criterio para la clasificación de la corrosividad del suelo empleado, se muestra a continuación en la Tabla 8.

Tabla 8

Grado de agresividad del suelo en función de la resistividad. *Fuente:* (Mecanz, 2016).

Corrosividad del Suelo	Resistividad del Suelo (Ωcm)
Altamente Corrosivo	<1000
Corrosivo	1,001 – 5,000
Poco corrosivo	5,001 – 10, 000
Muy poco corrosivo	>10,001

El estudio de CIPS, es una técnica de inspección indirecta desarrollada para determinar el nivel de protección catódica que tiene un ducto enterrado o sumergido. La detección del ducto se desarrolla través de un equipo detector de estructuras metálicas, rectificadores de voltaje y equipo GPS, los potenciales ducto-suelo son registrados con corriente encendida (potenciales “On”), así mismo con corriente apagada (potenciales “Off”), estos datos se registran a cada metro y se ingresan los comentarios pertinentes por el operador, en base al cumplimiento de la normativas (PEMEX, 2007). Las mediciones de pH, se desarrollan mediante el método Wenner con electrodos de Cobre/Sulfato de Cobre (Cu/CuSO_4) y un electrodo de antimonio, así como un voltímetro convencional (Marušić, Kekez, & Martinez, 2019). Los resultados del estudio de resistividad y pH del suelo a lo largo del DDV, se divide en secciones (tramos) como se ejemplifica a continuación el tramo no.9 que comprende suelos de la E-5 a E-6.

En la figura 20, se muestra el perfil del pH a lo largo del tramo, presentando el pH obtenido en el eje “y” en cada dato de distancia eje “x” correspondiente [A], se desarrollaron 911 lecturas del suelo del Km 408 al 498, la clasificación de los resultados [B], determinan un Ph

promedio del suelo 5.8. El levantamiento de resistividad del suelo presenta el valor de resistividad calculada en el eje “y” en cada dato de distancia del eje “x” correspondiente [C], con 907 lecturas del suelo, la clasificación de los resultados [D], determinan una resistividad promedio del suelo = 2,506.1 Ω -cm.

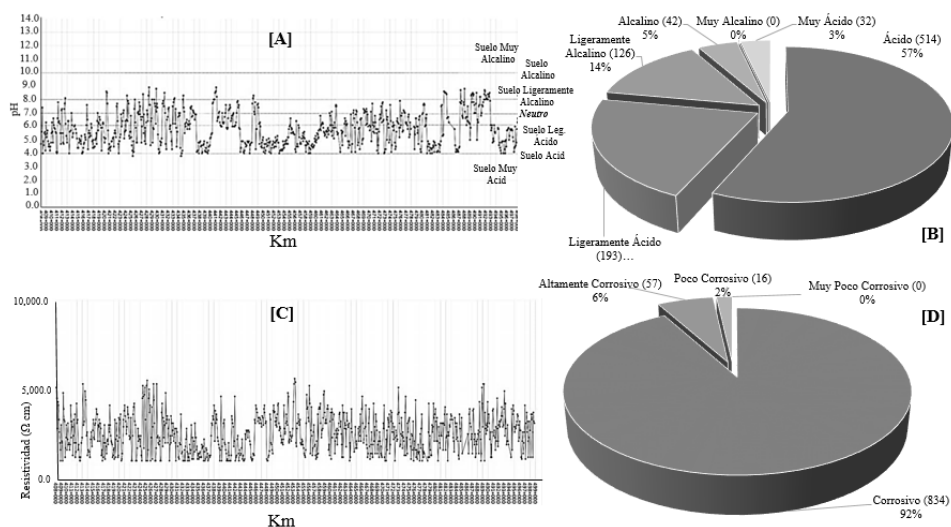


Figura 20. Estudios de pH y Resistividad del tramo no.9 *Fuente: (Mecanz, 2016).*

De acuerdo a los datos anteriores y el estudio general al STO, el % de los datos registrados se ilustra en la figura 21, considerando que se tiene un pH ácido y ligeramente ácido en la misma proporción [A], un suelo altamente corrosivo y corrosivo [B], se deberá de tener presente esto para el nivel de protección catódica y el estado del recubrimiento mecánico, ya que al ser un suelo muy agresivo, se ve reflejado en el estado del recubrimiento mecánico.

El estudio de CIPS, del Tramo No. 9, se presenta en la gráfica [C], el cual se encuentra influenciado por 5 rectificadores (RPC), con gran diferencia de potenciales y resistencia entre ellos, varios por debajo de la referencia de -850 milivoltios (mV) establecido por la normativas (PEMEX, 2007), NACE-SP0169-2013 numeral 6.2.1.3 (NACE Standard, 2013), tomando como base la diferencia entre potenciales On y Off (corte) se tiene que el 82.90% de los datos se encuentran por arriba de los -100 mV de corte. Con base a la normativa establecida se explica de manera general, el cumplimiento del estudio en los tramos del STO, con potenciales en On [D] y en off [E], lo que establece zonas críticas del SPA.

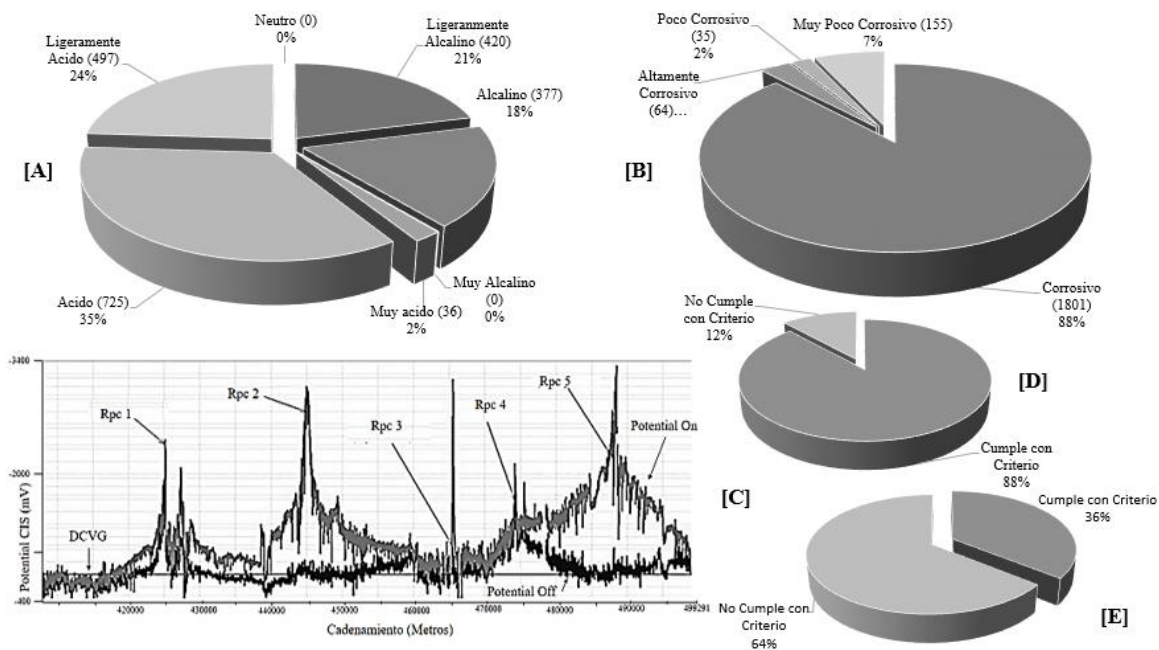


Figura 21. Estudios de PH, Resistividad y CIPS. Fuente: (Mecanz, 2016).

4.5.1.3 Subsistema 3 – Integridad Mecánica (Ultrasonic Intelligent pigging Inspection).

El estudio de integridad mecánica (EIM), desarrollado en el STO del CDM, de E-1 a E-7, en el Oleoducto 24” – 30” Ø (Weatherford, 2006). Los EIM, son herramientas de gran utilidad para conocer el estado mecánico del STO y determinar los planes de mantenimiento del mismo, un equipo de inspección por ultrasonido es un vehículo automático de inspección interna usado para examinar un ducto y detectar defectos en la pared del tubo, utilizando un método ultrasónico mediante sensores de ultrasonido dirigidos radialmente. El reporte del EIM, del tramo 9 comprende los resultados del análisis de severidad de la inspección interna obtenida utilizando un equipo de inspección que emplea la tecnología de Ultrasonido de Haz Recto. El estudio ha revelado 4651 indicaciones de pérdida de metal, 151 defectos de geometría, 22 defectos a media pared y 837 anomalías registradas (Weatherford, 2006).

El tratamiento de los datos del EIM, se enfoca en retomar las bases de datos así como hojas de verificación de los puntos no atendidos en la sección de estudio, generando las bases para determinar su comportamiento y crecimiento con respecto al tiempo mediante un análisis de componentes principales (ACP). Las variables a considerar son **EPI**, espesor de la pared interna de la tubería. **PPM del EPI**, estipula el porcentaje del defecto asociado con adelgazamiento de la pared de una tubería por orígenes mecánicos, de manufactura o corrosión. **LIP**, analiza los defectos en la pared interna de la tubería, asociados con discontinuidad en las capas metálicas en forma de inclusiones extrañas incrustadas en la estructura. **ANPI**, identifica el ancho de la pared interna de la tubería. **PARED**, identifica si la afectación de la tubería es interna (1) o externa (2). **FER**, la metodología establecida por la empresa para determinar procesos de reparación en la tubería, definida por la ecuación 1. (Weatherford, 2006).

$$FER = \frac{MAOP}{P\ safe} \quad (1)$$

La máxima presión segura **P safe** para un ducto con un indicador de pérdida de metal se define como:

$$P\ safe = P\ yield * \left(\frac{1-Q}{1-Q/M} \right) \quad (2)$$

Donde:

$$P\ yield = \frac{2t}{D} \left(SMYS + \frac{68.9}{9.8067} \right) * F_d, \quad (3)$$

$$\text{to } A = 0.85 * L * d \text{ y } A_0 = L * t \quad Q = \frac{A}{A_0}, \quad (4)$$

$$\text{to } \frac{L^2}{d*t} \leq 50 \quad M = \sqrt{1 + 0.6275 \frac{L^2}{D*t} - 0.003375 \frac{L^4}{D^2*t^2}}, \quad (5)$$

$$\text{and to } \frac{L^2}{d*t} \geq 50 \quad M = 0.032 * \frac{L^2}{d*t} + 3.3 \quad (6)$$

MAOP – Presión de funcionamiento máxima permitida, **P safe** - Presión de seguridad máxima para una tubería con una indicación de pérdida de metal, **A** - Área de indicación de pérdida de metal, **A₀** - Área de sección transversal defectuosa con la misma longitud igual a la longitud del metal indicación de pérdida, **M**- Factor de folios, **t** - Espesor nominal de la pared, **d** - Profundidad de pérdida de metal, **L** - Longitud de pérdida de metal medida, **D** - Diámetro de longitud nominal externa, **SMYS** – Límite elástico mínimo especificado del material de la tubería, **F_d** - Factor de diseño. Si la presión máxima permitida de un ducto con un defecto es menor que el MAOP, ese defecto debe repararse (Weatherford, 2011).

El primer componente principal representa 39% de la varianza total. Las variables que se correlacionan más con el primer componente principal (PC1) son PPM del EPM (0.461), LIP (0.502) y ANPI. El primer componente principal se correlaciona positivamente con estas tres variables. Por lo tanto, aumentar los valores de PPM del EPM, LIP y ANPI aumenta el valor del primer componente principal (FER). Los tres primeros componentes principales explican 73.8% de la variación de los datos. Por lo tanto, se considera el comportamiento de estos componentes para analizar la integridad mecánica del sistema., como se ilustra a continuación en la tabla 9.

Tabla 9.

ACP Tramo 9, E-5 a E-6. *Fuente: Basado en (Weatherford, 2006).*

Análisis de componente principal: FER, EPI, PPM del EPM, LIP, ANPI, PARED

Análisis de los valores y vectores propios de la matriz de correlación

Valor propio	2.3422	1.2225	0.8607	0.6261	0.5263	0.4221
Proporción	0.390	0.204	0.143	0.104	0.088	0.070
Acumulada	0.390	0.594	0.738	0.842	0.930	1.000

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
FER	0.514	-0.013	-0.259	-0.218	-0.542	-0.572
EPI	-0.192	-0.673	0.506	0.333	-0.304	-0.225
PPM del EPM	0.461	0.026	-0.242	0.837	0.052	0.156
LIP	0.502	-0.224	0.255	-0.309	-0.245	0.691
ANPI	0.483	-0.085	0.407	-0.124	0.679	-0.343
PARED	0.028	0.699	0.623	0.172	-0.301	-0.053

La grafica de sedimentación ordena los valores propios desde el más grande hasta el más pequeño (Minitab, 2017). La tendencia de la magnitud y la dirección de los coeficientes, demuestra que el EPI, genera una variabilidad importante en el cálculo del componente FER, como se ilustra en la figura 22, imagen [A]. La grafica de influencias [B] muestra de manera visual el comportamiento de los dos primeros componentes (Minitab, 2017). El primer componente principal tiene asociaciones positivas grandes con PPM del EPM, LIP y ANPI. El segundo componente tiene asociaciones negativas con EPI y positiva con PARED.

La grafica de valores atípicos [C], identifica las características de los componentes que numéricamente son distintos del resto de los datos (Minitab, 2017). El grafico nos indica que existe un 27% de valores atípicos por encima de la línea de referencia. La grafica de puntuaciones [D], representa visualmente las puntuaciones del segundo componente principal versus las puntuaciones del primer componente principal (Minitab, 2017). Se identifica en la esquina inferior izquierda una serie de valores atípicos negativos, los cuales tienden a separarse del conglomerado, lo cual debe ser analizado.

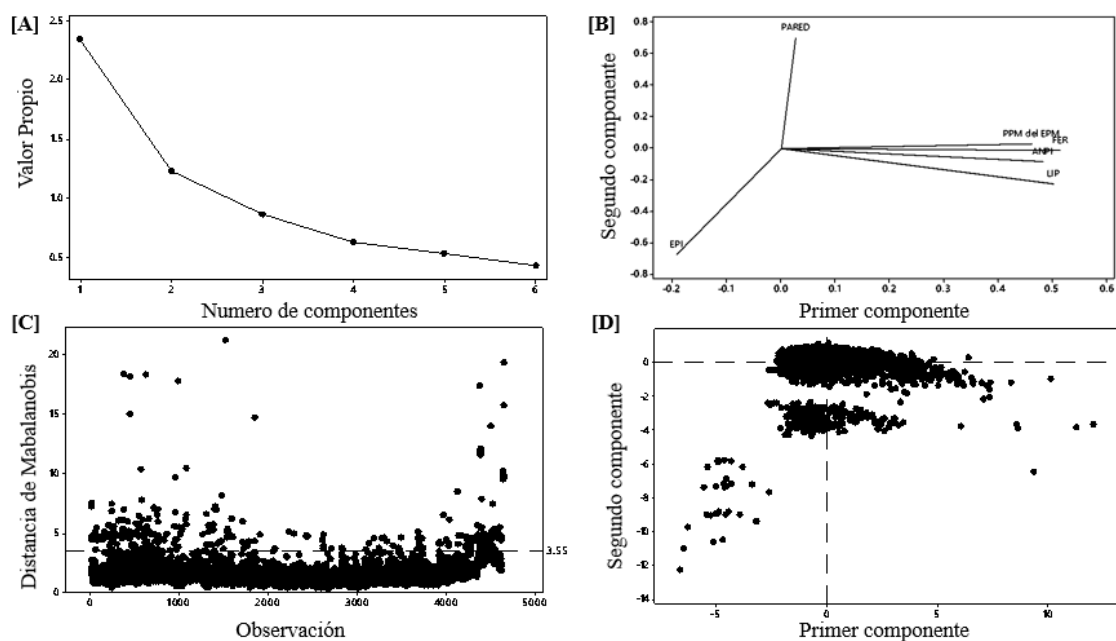


Figura 22. Gráfico de sedimentación, influencias & valores atípicos *Fuente: Basado en (Weatherford, 2006).*

El grafico de dispersión por grupos permite evaluar la correlación, entre los componentes principales. La figura 23, muestra la conglomeración de datos con un factor estimado de reparación entre 0.5 & 0.9, lo que demuestra un alto grado de afectación al STO. Representando la correlación entre el FER y los componentes, clasificando por grupos la identificación de los defectos en la pared del oleoducto (Interna & Externa). El grafico, permite visualizar que los indicadores con mayor factor estimado de reparación (FER), se generan en la pared externa de la tubería, por lo general en todos los componentes.

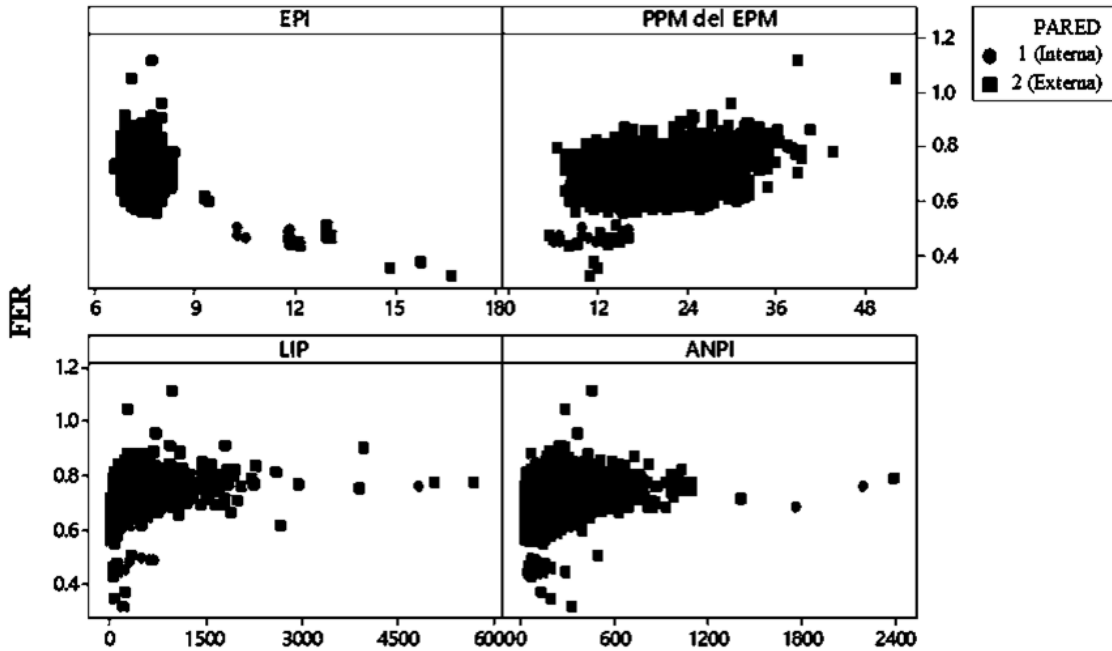


Figura 23. Gráfico de dispersión de FER vs EPI, PPM del EPM, LIP & ANPI. *Fuente:* Basado en (Weatherford, 2006).

4.5.1.4 Sub sistema 4 – Análisis Metalográfico.

El propósito del subsistema es mostrar un análisis metalográfico de un oleoducto subterráneo fuera de servicio por cuestiones de fallo, con más de 60 años de servicio. A través de este análisis, se gestiona el conocimiento generacional de patrones corrosivos en oleoductos terrestres, con el fin de fortalecer áreas del campo de estudio.

El módulo incluye un análisis metalográfico, procesos de ataques químicos, análisis de rugosidad, medición de espesores y corrosión por ultrasonido, así como ensayos de tracción de la muestra, con el fin de conocer la composición del material, su resistencia y sus condiciones físicas. Tras el análisis de las pruebas de laboratorio, las características físicas y químicas se compararon con las regulaciones nacionales e internacionales existentes, lo que permitió una caracterización específica de las condiciones de la muestra con un acero API L X65.

El desarrollo de las pruebas de laboratorio para realizar el análisis y caracterización de la tubería de acero, de conformidad con las normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, 2011, 2018; ASTM E8, 2010) y el Instituto Americano del Petróleo (Institute, 2007); donde las pruebas metalográficas incluyen la observación de la microestructura del acero en el microscopio electrónico óptico y de barrido. Para conocer la microestructura del acero en estudio, las siguientes técnicas de acuerdo con ASTM E3, se utilizaron estándar 2011 (ASTM, 2011).

4.5.1.4.1 Extracción y Preparación de la muestra metalográfica.

El oleoducto tenía 24" Ø y un espesor variable de 11 a 8 mm, una muestra (12"x10"), extraída del municipio de Esperanza, Puebla en México, después de atender una emergencia por derrame de hidrocarburo en junio del 2019 [A] (El sol de Puebla, 2019). La muestra se observa, con diversas grietas, abolladuras a lo largo de su longitud, la cual demuestra estar totalmente corroída y con residuos de un recubrimiento, empleado para sustratos sometidos a la humedad extrema y ambientes corrosivos. Consecutivo al proceso de limpieza del oleoducto se procedió a seccionar la muestra de estudio. Después de examinar la muestra, se eligieron las áreas adecuadas para el corte de las sondas que se utilizan en el análisis metalográfico, respetando dimensiones y tamaños estandarizados [B], para culminar con un proceso de encapsulado con baquelita, una sustancia con plástico sintético, con el fin de facilitar procesos de moldeado y solidificación, la muestra se colocó en el interior del émbolo de la prensa hidráulica, con 40 ml de baquelita a una temperatura de 190 °c, bajo una presión de 23 Kilo Nnewtones (KN), durante 9 minutos. Después del tiempo la muestra se enfrió y queda lista para el siguiente proceso [C]. Se emplearon sondas longitudinales y transversales, tomadas desde el centro y extremo con el espesor más saludable. El análisis de las sondas se desarrolló en un microscopio electrónico de barrido a diversos aumentos, con mediciones inferiores a 1 cm³, con aumentos más pequeños de hasta 50 µm.

El proceso de pulimiento, se llevó a cabo con el fin de eliminar la superficie corrosiva, se limpió y se obtuvo un solo plano para el pulido final. Para lograr esto, se utilizaron lijas con diversos abrasivos de tamaños de grano. Las caras de las muestras también se corrigieron mediante un molinillo especializado en procesos metalográficos, para alisar la superficie y continuar con las lijas restantes. Antes de cambiar el abrasivo, la posición de la muestra se rotó a 90° para eliminar las líneas y hacer que sea más suave que el papel de lija anterior (Angel & Toquiantzi Butrón, 2008). El proceso de pulido permitió el alisado de las líneas que dejan la molienda y la consecución de una superficie espejo. Para esto, se utilizó un paño especial en un disco giratorio y una solución hecha a base: 8,75 g de alúmina 0,3 Micra y 300 ml de agua destilada. El disco se programó a 300 RPM, antes de colocar la muestra, la limpieza se desarrolló con un cepillo y agua para eliminar cualquier residuo, que pueda rayar las sondas. Después, la solución de alúmina se vertió sobre la tela y cada sonda se pulió al girar a contra-reloj, con el fin de obtener la mejor superficie [D]. La metodología grafica se ilustra a continuación en la figura 24.

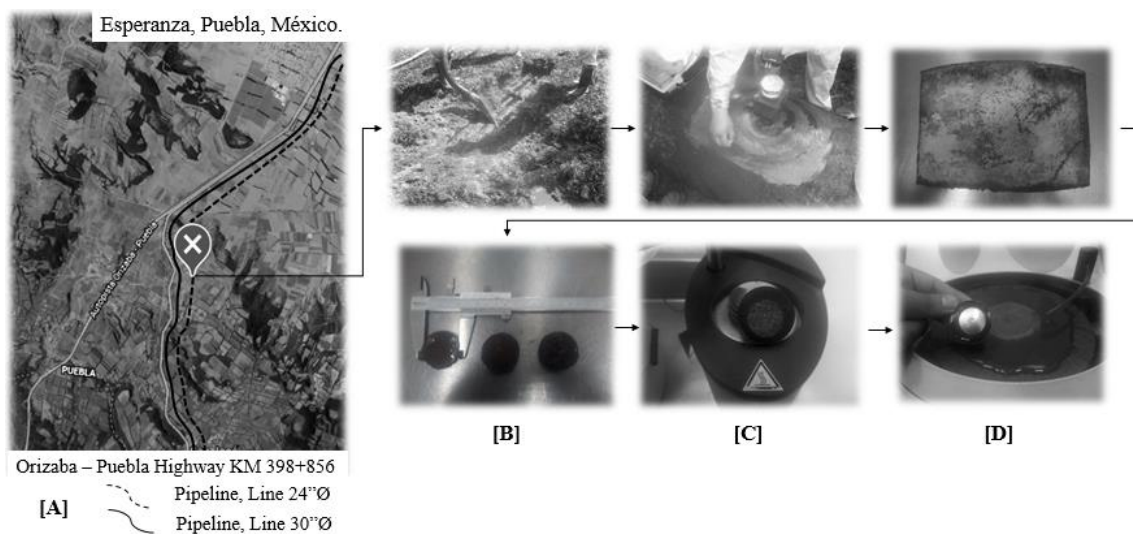


Figura 24. Metodología de extracción y preparación de la muestra metalográfica.

Fuente: Basado en (ASTM, 2011, 2018; ASTM E8, 2010).

Se utilizó la prueba química para revelar las características micro estructurales del acero bajo estudio. Para ello, fue necesario utilizar Nital 1 (solución compuesta por 99% de alcohol etílico y ácido nítrico 1%).

La solución se vertió en un catalizador de cristal y cada sonda pulida se sumergió durante 25 segundos. Al finalizar, las muestras se lavaron con agua destilada y se secaron con un secador automatizado. Después del ataque en la superficie de las muestras, los límites de grano se dibujan con un color opaco que ayudó a observarlos en el microscopio óptico. La caracterización de la sonda 1 se ilustra en la imagen 24, la cual muestra en general una microestructura compuesta de ferrita (áreas claras) y colonias de perlita (áreas oscuras) para el acero API 5L X65 (Magnificación 50 micras “ μm ”) obtenidas mediante microscopía óptica [A-D]. La fase perlita funciona como cátodo, por lo que una distribución de fases ferrita-perlita heterogénea, indica posiblemente la disolución localizada del material. Mientras que una distribución homogénea genera una capa uniforme la cual puede proteger a los aceros de su continua disolución. El acero analizado indica un porcentaje de fase de perlita de 1.039 % con una distribución de fases heterogénea, lo que hace susceptible al material a procesos de agrietamiento por corrosión y tensión.

Las micrografías obtenidas, fueron utilizadas para el cálculo del tamaño de grano de los aceros a través del método de intercepción lineal, que estima el tamaño medio de grano contando el número de granos interceptados por una o más líneas rectas suficientemente largas dibujadas sobre una plantilla con las mismas dimensiones que las micrografías obtenidas. Con las formulas de la norma ASTM E-112 ([ASTM International, 2004](#)), se obtuvo el valor de la intercepción promedio, el cual se compara con los valores en tablas, para determinar un tamaño de grano 9 [E], el cual sufrió alteraciones según la ficha informativa del proveedor, irrumpiendo la generalidad de forma del granos de tipo equiaxiales con forma poligonal y de tamaño uniforme. Estos aceros se caracterizan por tener bajo contenido de carbono y se aprecia claramente en las micrografías debido a que las áreas blancas que corresponden a ferrita son más notables, la metodología descrita se simplifica a continuación en la figura 25.

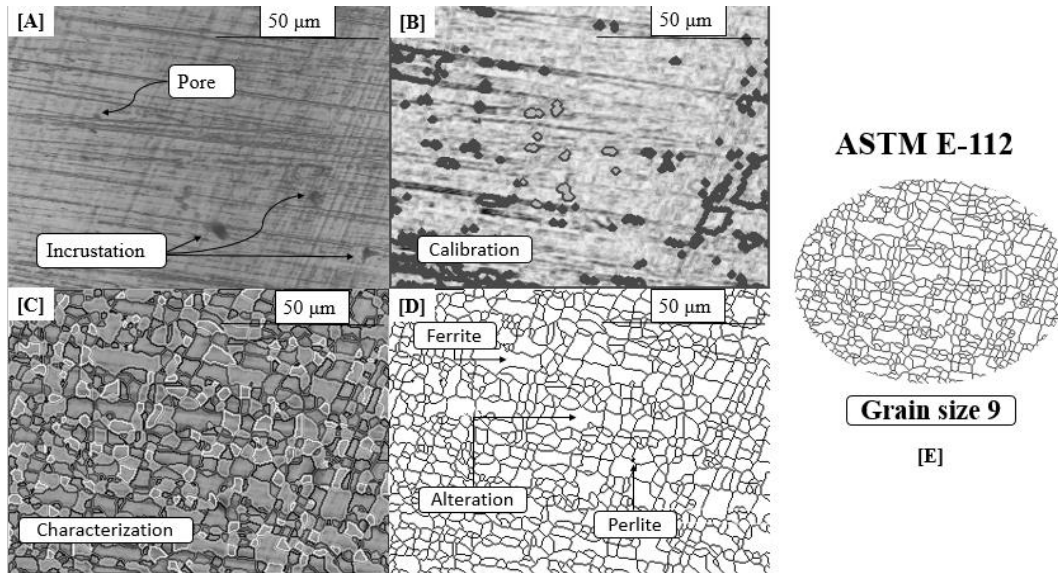


Figura 25. Proceso micrográfico. **Fuente:** Basado en (ASTM International, 2004; de Tuber\`ia, 1991)

En general, la composición química del acero en estudio es ilustra en la figura 26, considerado una aleación con alto contenido de carbono, puesto que es 6 % en peso, mientras que el hierro se corresponde con la mayor parte de su contenido con un promedio de 91% en peso, como se demuestra en la gráfica de composición química en kiloelectrons por segundo (kV), con un Voltaje: 20,0 kV (B). Otros componentes son el manganeso y silicio, que están presentes en los aceros utilizados comúnmente, la composición química de la muestra se presenta a continuación en la Tabla 10.

Tabla 10

Componentes químicos con referencia de pesos y átomos.

Elemento	Peso (%)	Átomos (%)
CK	6.33	20.62
Si K	0.96	1.79
Cr K	0.71	0.94
Mn K	1.93	1.22
Fe K	90.07	75.43
Total	100.00	100.00

Se ilustra en la figura 26, la composición química de la muestra, en donde una estructura uniforme de los componentes químicos aparece claramente [A]. Las figuras respectivamente, muestran la composición química, en kiloelectrons por segundo, de las zonas 1, 2 y 3, respectivamente.

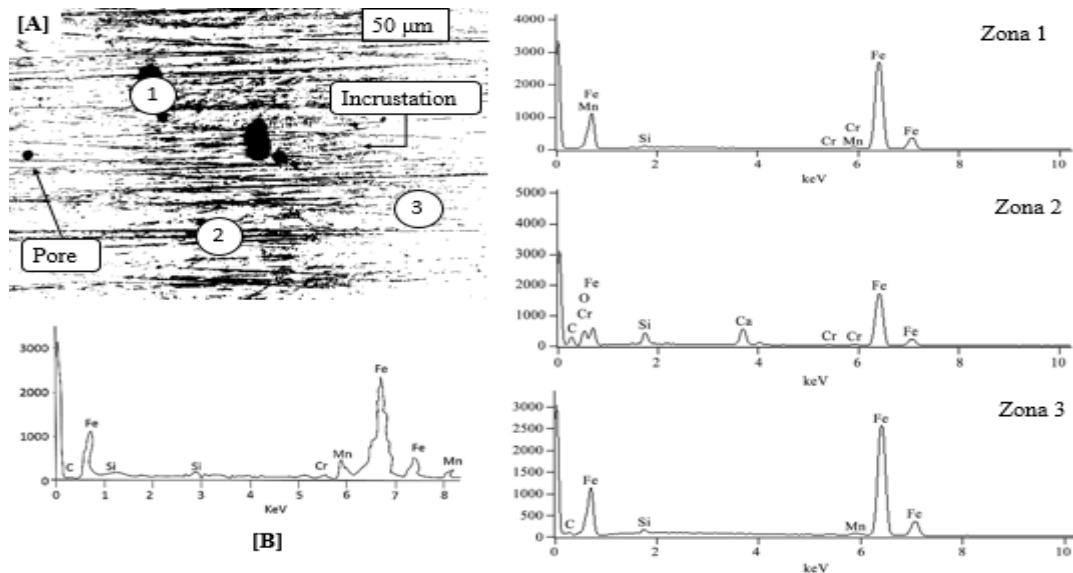


Figura 26. Composición química del acero por zonas. *Fuente: Elaboración propia*

4.5.1.4.2 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se llevó a cabo para obtener las propiedades mecánicas y para determinar el grado del acero (Ortea, 2010). La ilustración [A] de la figura 27, muestra las medidas bajo el estándar ASTM E8/E8M de dos sondas utilizadas en dichas pruebas y los resultados obtenidos de una manera continua (ASTM E8, 2010; Martínez Rodrigo, Museros Romero, Poy Gil, & Romero García, 2013).

La Tabla 11 muestra las mediciones de longitud, anchura y espesor para cada sonda antes de ser sometidas. Esta tabla también muestra sus características finales. Las sondas 1 y 2 contienen picaduras o grietas por factores corrosivos que representan la fatiga del material, haciéndolas menos resistentes a deformaciones por esfuerzos operativos.

En total se trabajó con 6 sondas, se presentan en el estudio solamente 2 sondas representativas, derivado a similitud en resultados y longitud del trabajo.

Tabla 11

Características de las sondas.

A partir de las características:			
Unidades	Espesor mm	Anchura mm	Longitud Calibrada mm
T01	3.050	13.200	50.000
T02	3.060	13.200	50.000
Características finales:			
Identificación de la sonda	Espesor máximo mm	Ancho máximo mm	Longitud máxima
T01	2.40	10.28	56.00
T02	2.45	10.30	56.10

4.5.1.4.3 Sonda 1

Esta sonda tiene una relación de alargamiento lineal debido al tiempo, de acuerdo con la imagen [B]. En 83 segundos, se alarga hasta 4,09 milímetros (mm). La ilustración [C] muestra la relación de carga-deformación para la misma sonda. Los resultados del ensayo de tracción demostraron que la muestra puede tener una resistencia a la fluidez de 394 mega pascuales (MPa) y una resistencia a la tracción 501 MPa [D], en promedio. Esto muestra que fue un acero de alta resistencia. Los resultados generales de las dos sondas se muestran en la Tabla 12.

4.5.1.4.4 Sonda 2

El gráfico en tiempo de elongación para esta sonda también es lineal, muy probablemente debido al hecho de que es un material isotrópico, es decir, sus propiedades son las mismas en todas las direcciones.

La ilustración [C] muestra la relación de carga-deformación para la sonda 2 y la ilustración [D] muestra el comportamiento de la gráfica de tensión-deformación, donde se obtuvo una variación mínima del resultado con 404 MPa Resistencia a la fluidez y 517 MPa resistencia última a la tracción.

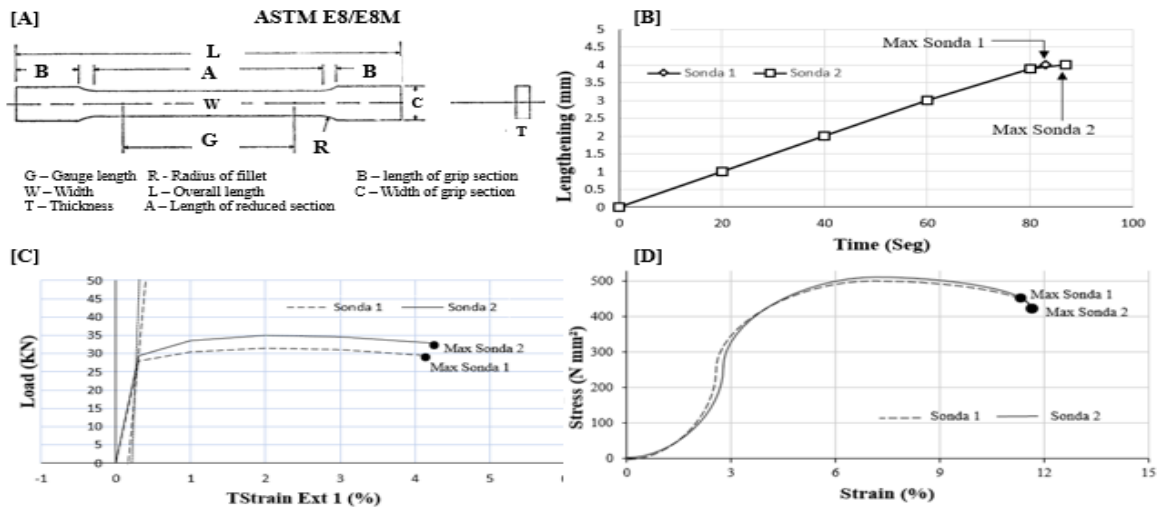


Figura 27. Gráficos referentes al ensayo de tracción. *Fuente: Basado en (ASTM E8, 2010; Martínez Rodrigo et al., 2013).*

Tabla 12

Resultados finales del ensayo de tracción.

Identificación de la Sonda	Alargamiento		Fuerza de fluidez		UTS	
	%		MPa	Psi	MPa	Psi
T01	4.09		394	57144	501	72663
T02	5.6		404	58595	517	74984
Promedio	4.8		399	58870	509	73824

4.5.1.4.5 Caracterización mecánica - Ensayos de dureza método Rockwell y Vicker's

La dureza es una condición de la superficie del material, que no representa ninguna propiedad de la materia y está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas del material. El método por penetración establece, la resistencia de un material a la indentación permanente bajo cargas estáticas o dinámicas, en este sentido definiremos la resistencia de un material a la deformación plástica localizada (Ortea, 2010).

Se desarrollaron mediciones de dureza Vicker's y Rockwell al acero API 5L X65 de estudio de acuerdo a las normas ASTM E-92 y ASTM E-18 respectivamente (Comittee, 2004). La ASTM E-140 (ASTM Internaional, 2012), define las tablas de conversión de dureza estandarizadas a emplear en los ensayos (Vicker's y Rockwell), se emplea un indentador esfera de un 1/16", de uso exclusivo para aceros recocidos y normalizados. Los ensayos empleados se recomiendan especialmente para determinar la dureza de los materiales muy duros, con valores de dureza superiores a 500HB. Para materiales con una dureza inferior, se recomienda emplear el ensayo de Dureza Brinell. El valor numérico de la dureza Vicker's (HV) se obtiene dividiendo la carga P (kp) entre la superficie de la huella S (mm²) dejada sobre la probeta. La carga empleada fue de 30 Kilo pascales (Kp) con un tiempo de aplicación de 15 segundos.

El ensayo Rockwell (HR) se definió mediante una escala B que define el indentador esfera de 1/16" y una carga principal de 100 Kp. Los resultados de los ensayos de dureza vicker's [A] y Rockwell [B] del acero API 5L X65, muestran una diferencia porcentual negativa del 26.9% y 19.8% con respecto a los valores establecidos por la ASTM E-140 (ASTM Internaional, 2012), el grafico [C] de la figura 28, representa el comportamiento del estudio.

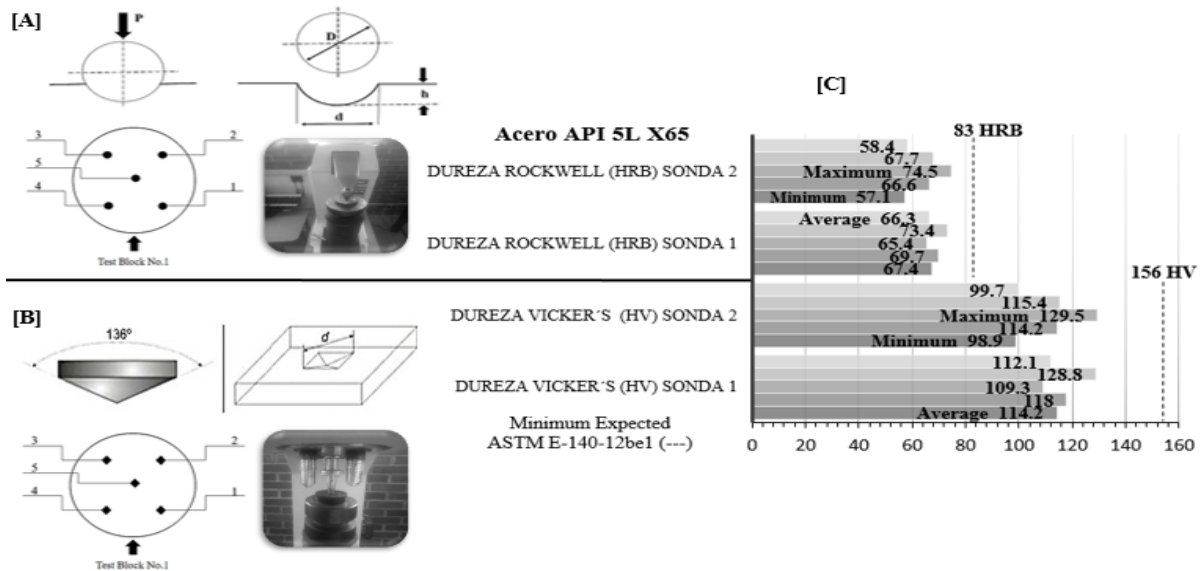


Figura 28. Ensayos de dureza Rockwell y Vicker's *Fuente: Elaboración propia.*

4.5.1.4.6 Análisis de la corrosión por equipo de ultrasonido y microgeometría del material.

La medición de espesores por ultrasonido se logra cronometrando el tiempo que demora una onda acústica en recorrer la distancia que se va a medir (demeq, 2005), el principio de funcionamiento se ilustra en la imagen [A] de la figura 30. El proceso de experimentación se llevó a cabo un equipo QS5, con diversas sondas de (7.87" & 1.96"), con un espesor por fabricante entre capas de 11mm. El equipo de medición por ultrasonido mantiene una velocidad nominal de 1.20 mm/Segundo, en procesos de medición longitudinal.

Con un perímetro de 39.37" se obtuvieron 800 mediciones con una variabilidad entre sus datos, ocasionado por la diversidad de cavidades del material por efectos de corrosión avanzada, en la figura 29 se ilustran los resultados de la medición por ultrasonido en la Sonda 1 [B] así como indicadores de pérdida metal del 22% [C] con respecto a especificaciones del fabricante, las mediciones de longitud, permitieron definir la microgeometría de las superficies para cada sonda, después de un proceso de fatiga estructural, mediante un rugosímetro Mitutoyo SJ-201, identificando variabilidad entre cavidades de 905.51 a 1023.62 micro pulgadas (μin), generadas por efectos corrosivos [D].

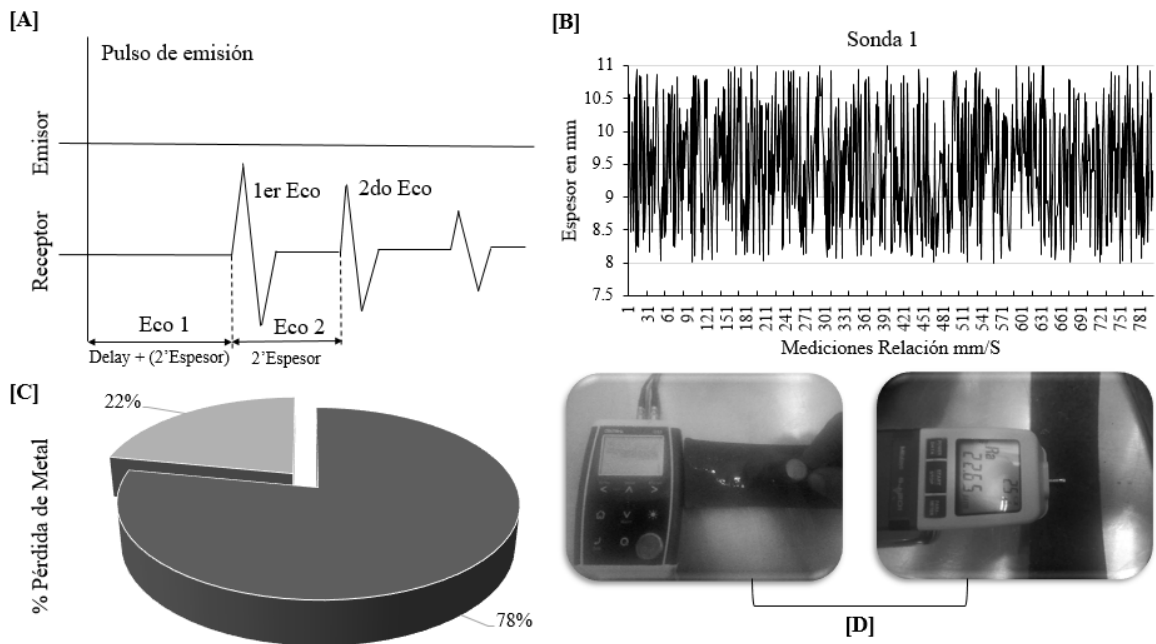


Figura 29. Análisis de corrosión por ultrasonido y Rugosidad. *Fuente:* Basado en (demeq, 2005; Mitutoyo, 2003).

4.5.2 Diseño del sistema de Diagnóstico

El detectar fallos en procesos complejos, puede ocurrir que no existen modelos matemáticos del mismo. Una forma de obtener dichos modelos a partir de los datos de entrada/ salida en situación de buen funcionamiento es empleando técnicas de inteligencia artificial, (Redes Neuronales, Lógica difusa, Algoritmos Genéticos) o combinaciones de ellas para diagnosticar mediante observadores de forma robusta procesos no lineales de los que no se dispone de un conocimiento analítico (Puig et al., 2004a). Una vez realizada la detección, es necesario realizar un análisis de la causa que ha provocado la no consistencia, es decir diagnosticar la falla (Puig et al., 2004a). Los algoritmos desarrollados parten de la caracterización del comportamiento nominal del fluido en el oleoducto (“Algoritmos de diagnóstico para fallas en ductos,” 2014). El modelo analítico del SMT a PCGC, se representan en la tabla 13, a partir de un análisis de correlación en 28 escenarios de falla, producidos mediante registros históricos, datos de campo, experimentación y experticia.

Tabla 13Escenarios de falla del STO. *Fuente: Elaboración propia*

Subsistema 1 - Programa & Instrumentación Operativa del STO (SCADA)	
E1	Falla en equipo dinámico de la estación de bombeo aguas arriba (Envío de Producto).
E2	Falla en equipo dinámico de la estación de bombeo aguas abajo o almacenamiento (Recibo de Producto).
E3	Falla por comunicación operativa de la estación aguas arriba y abajo (Envío y recibo de producto).
E4	Falla por exceder la MAOP (Máxima presión segura para una tubería con un indicador de pérdida de metal).
E5	Falla en determinado sensor de flujo aguas arriba (Envío de Producto)
E6	Falla en determinado sensor de flujo aguas abajo (Recibo de Producto)
E7	Falla en determinada válvula de seccionamiento de línea, retención y trampa de diablos.
E8	Fuga en una posición desconocida de la tubería. (Robo de Hidrocarburo)
E9	Fuga en una posición de la tubería por deterioro mecánico. (Fractura del material)
Subsistema 2 - Sistema de Protección Anticorrosiva (SPA).	
E10	Falla en rectificador de voltaje, variabilidad de potenciales y puentes eléctricos.
E11	Falla en cama anódica, ánodos, cátodos, conexiones y conductores.
E12	Falla en recubrimiento mecánico de la tubería.
E13	Falla por agresividad corrosiva del suelo (grado del pH)
Subsistema 3 – Integridad Mecánica (Ultrasonic Intelligent Pigging Inspection).	
E15	Falla por EPI (Espesor de la pared interna de la tubería)
E14	Falla por resistividad corrosiva del suelo (resistencia al flujo de una carga eléctrica)
E16	Falla por PPM del EPI (Porcentaje del defecto asociado con adelgazamiento de la pared de la tubería por orígenes mecánicos, de manufactura o corrosión)
E17	Falla por LIP (Defectos en la pared interna de la tubería, asociados con discontinuidad en las capas metálicas en forma de inclusiones extrañas incrustadas en la estructura).
E18	Falla por ANPI (Ancho de la pared interna de la tubería)
E19	Falla por PARED (Afectación corrosiva de la tubería interna o externa).
E20	Falla por FER, (Factor estimado de reparación de la tubería).
E21	Falla por deterioro mecánico en una sección de la tubería.
Subsistema 4 – Análisis Metalográfico (Micrografías, ultrasonido, Propiedades, caracterización mecánica y micro geometría del material).	
E22	Falla por exceder el SMYS (Límite elástico especificado del material de la tubería).
E23	Falla por exceder el FD (Factor de diseño de la tubería).
E24	Falla por alteración en el tamaño de grano de material de la tubería
E25	Falla por alteración en la composición química del material de la tubería
E26	Falla por alteraciones a las propiedades físicas y elásticas del material de la tubería.
E27	Falla por agrietamiento y cavidades en los espesores del material de la tubería.
E28	Falla por alteración micro geométrica del material de la tubería.

Se procedió a emplear una metodología mediante una matriz de firmas de fallo teórica Σ partiendo de un conjunto de indicadores de consistencia denominados relaciones de redundancia (ARRs) y observadores de estado dinámicos de altas ganancias para reconstruir la evolución de la falla detectada. Dichas relaciones se obtienen a partir de los enlaces de los elementos del sistema (Escenarios) 30 [A].

La matriz contiene de forma codificada la dependencia de un determinado escenario de fallo (columna de la matriz) con cada residuo (fila de la matriz). Un elemento Σ_{ij} de esta matriz es igual a 1 si el fallo de la columna f influye en el residuo de la fila i , en caso contrario será 0, partiendo de la hipótesis de falla simple, donde en tiempo real cada uno de los residuos $r_i(k)$ considerado será evaluado respecto a su umbral t_i , proporcionando un conjunto de firmas de fallo observadas del sistema $s(k) = [s_1(k), \dots, s_n(k)]$, donde: (Puig et al., 2004a).

$$S_i(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } r_i(k) < t_i \\ 1 & \text{if } r_i(k) > t_i \end{cases} \quad (7)$$

El aislamiento del fallo consistirá en encontrar, cuál de las firmas de falla de la matriz se aproxima más a la firma $s(k)$ encontrada experimentalmente. La matriz de firmas de falla teórica Σ sigue el criterio que una X representa incidencia y un cuadro blanco no incidencia, una metodología de interacción mediante algoritmos de observación dinámica, empleando variables de proceso $\bar{x}(t)$, mediciones disponibles ($u(t)$ & $y(t)$) y un término de corrección entre las mediciones y los estimados $e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$. La matriz de fallas permite visualizar que los escenarios 3,4 y 9 tienen una interacción muy cercana con todo el sistema [B], como se presenta a continuación en la figura 30.

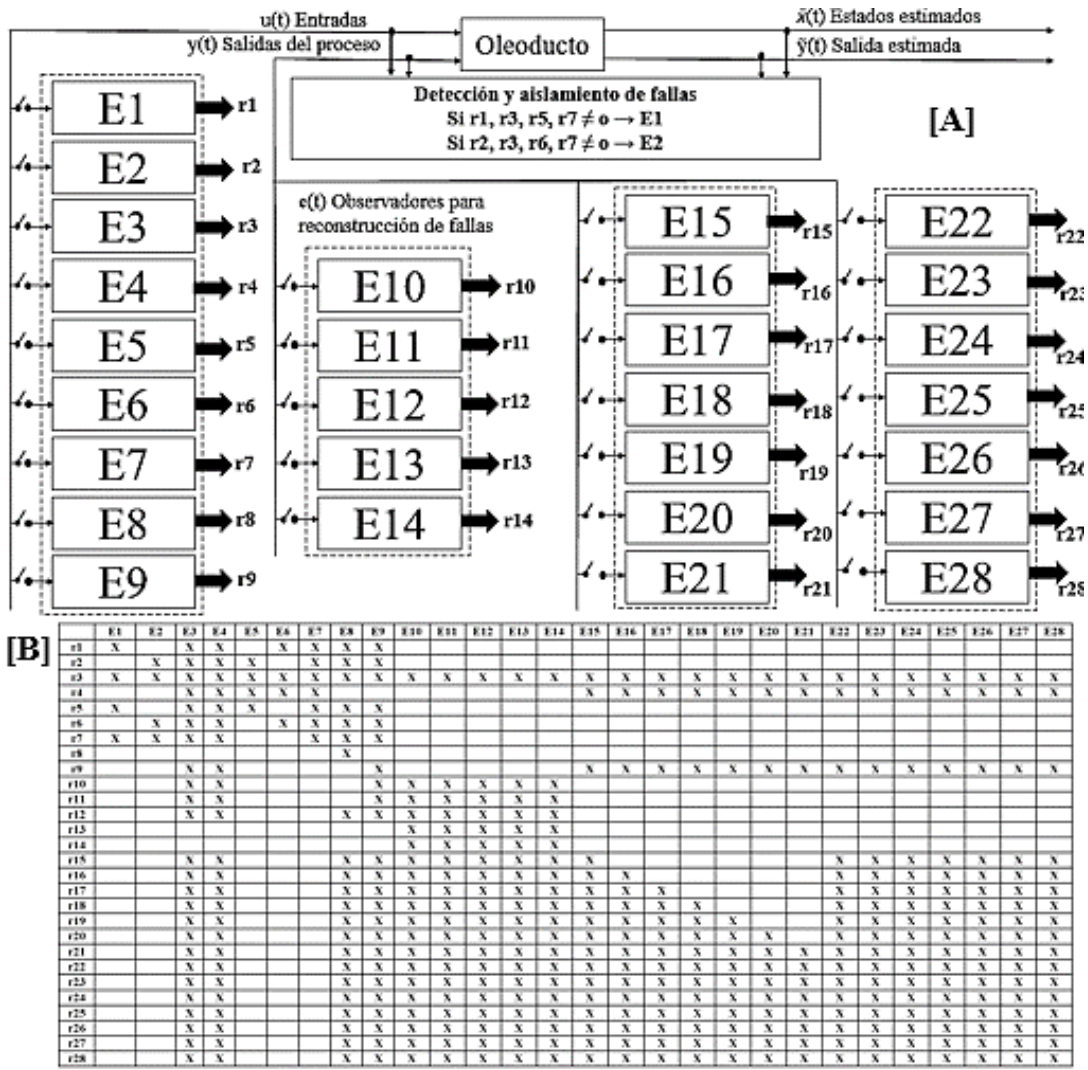


Figura 30. Esquema de diagnóstico de fallas para un oleoducto y Matriz de firmas de fallas. *Fuente: Elaboración propia.*

4.5.3 Tolerancia a Fallos.

4.5.3.1 Diseño de los mecanismos de tolerancia del SMT a PCGC

(Sub sistema 1).

Una vez desarrollado el esquema de diagnóstico y la matriz de firma de fallas para oleoductos, se procedió analizar la interacción de los escenarios de falla con el sistema principal, mediante la modelación dinámica de las variables que generan la activación de los escenarios de falla del STO a través de inteligencia artificial.

La tabla 14, presenta las variables de entrada, así como los escenarios de falla del Sub sistema 1 - Programa & Instrumentación Operativa del STO. Cabe destacar que el mecanismo de tolerancia presentado y desarrollado es de uso universal para representar el funcionamiento operativo de una estación aguas arriba y aguas abajo, interconectadas entre sí, con una longitud indeterminada por kilometraje en oleoductos. Sin embargo, se modela en la sección el punto de atención crítico por vandalismo del CDM, que inicia en la estación de potencia (E-5 A), ubicada en Ciudad Mendoza y (E-5) en Maltrata ambas en el estado de Veracruz, las cuales potencializan el flujo del hidrocarburo a causa de la complejidad topográfica de la zona hasta llegar a la (E-6) en San Martín, Texmelucan, Puebla.

Tabla 14

Variables de entrada y escenarios del Sub sistema 1.

Variables de Entrada.	
CPS-E5	Capacidad de presión de succión de la estación aguas arriba – E5
CPD-E5A	Capacidad de presión de descarga de la estación aguas abajo – E5A
MH-E5	Cumplimiento del mantenimiento histórico de la estación aguas arriba - E5
MH-E5A	Cumplimiento del mantenimiento histórico de la estación aguas abajo - E5A
MH-STO	Cumplimiento del mantenimiento histórico de la tubería entre las estaciones aguas arriba y abajo.
RH-E	Disponibilidad de recursos humanos para operar la estación.
TB-E	Disponibilidad de quipo dinámico (Turbo-bombas).
ES-E	Disponibilidad de válvulas desfogues, alarmas, tanques de recirculación y almacenamiento.
ECA-E	Disponibilidad de equipos de emergencia y generadores auxiliares de energía.
EMFI-E	Disponibilidad de equipo de medición, filtración, actuadores y sensores de flujo.
VR-STO	Disponibilidad de válvulas de retención de línea.
VS-STO	Disponibilidad de válvulas de sección de línea.
TD-E	Disponibilidad de trampas de envío y recibo de diablo.
IMF-STO	Disponibilidad de interconexión para los sistemas de mejorador de caudal.
ECM-STO	Disponibilidad de equipos de comunicación abierta y SCADA.
Variables de Salida.	
E1 & E2	Falla en equipo dinámico de la estación de bombeo aguas arriba u abajo (Envío o Recibo de Producto – Descarga u Succión)
E3	Falla por comunicación operativa de la estación aguas arriba o abajo (Envío y recibo de producto).
E4	Falla por exceder la MAOP (Máxima presión segura para una tubería con un indicador de pérdida de metal).
E5 & E6	Falla en determinado sensor u actuador de flujo aguas arriba o abajo (Envío o Recibo de Producto)
E7	Falla en equipos de instrumentación y seguridad de líneas (válvulas de seccionamiento, retención, trampa de diablos, tanques de almacenamiento, equipos de trasiego y contra incendios).
E8 & E9	Fuga en una posición de la tubería. (Robo de Hidrocarburo o fatiga del material).

Una vez determinadas las variables de entrada con ayuda de los especialistas se procedió a desarrollar los procesos de interconexión entre los escenarios, algunos unificados por aspectos de asimilación y aplicación para una estación aguas arriba o abajo. La ilustración 31, muestra el proceso de interconexión entre las variables de entrada y los escenarios de falla mediante colorimetría en un esquema difuso de tipo Mamdani, que facilitara la modelación dinámica del conocimiento cognitivo del personal especialista y las bases históricas de mantenimiento, operación e instrumentación del STO.

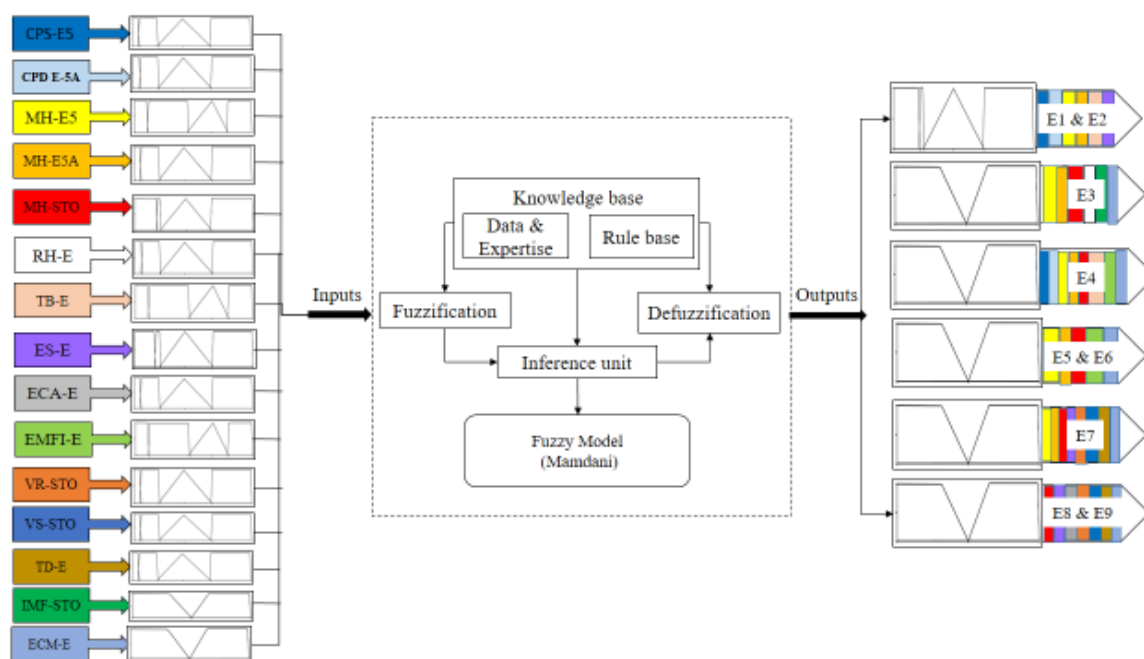


Figura 31. Arquitectura del Modelo Difuso de tipo Mamdani para el Sub sistema 1.
Fuente: Elaboración propia.

La arquitectura del modelo difuso del sub sistema 1, está conformada por un sistema de inferencia difusa y el proceso de capitalización del conocimiento de los operadores de la Industria de Petróleo y Gas, utilizando datos operacionales solo del oleoductos de 30"Ø, para su validación y posterior aplicación al oleoducto de 24 "Ø (Siler & Buckley, 2005). Un conjunto difuso es una forma general de un conjunto nítido. Un número difuso pertenece al intervalo cerrado 0 y 1, para el cual uno se refiere a la membresía plena y el cero expresa la no membresía (Yazdani-Chamzini & Yakhchali, 2012).

El modelo difuso consta de variables de decisión, así como de parámetros inciertos (entradas) y variables inciertas (salidas), que modelan los equipos y recursos operativos de un STO, interconectado a una estación aguas arriba y aguas abajo, para obtener parámetros operativos confiables, que permitan representar la dinámica del sub sistema 1, mediante una clasificación lingüística y procesos matemáticos en un modelo de tipo Mamdani. La Tabla 15 A, B y C, presentan las variables del sub sistema 1, su clasificación lingüística, así como sus unidades de medida ante los escenarios de falla.

Tabla 15-A

Etiquetas lingüísticas del Sub sistema 1.

Variables de Decisión (Inputs)	Etiqueta lingüística	Función de membresía	Intervalos
Capacidad de presión de succión de la estación aguas arriba – E5 (Kg/cm ²) CPS-E5	Fuera de operación	1-Gama	(0, 0.01, 3.99, 4.00)
	Baja	Trapezoidal	(3.99, 4.01, 18.49, 18.50)
	Promedio	Triangular	(18.49, 37.50, 55.50)
	Alta	Gama	(55.49, 55.51, 75.50, 85.50)
Capacidad de presión de descarga de la estación aguas abajo – E5A (Kg/cm ²) CPD-E5A	Fuera de operación	1-Gama	(0, 0.01, 3.99, 4.00)
	Baja	Trapezoidal	(3.99, 4.01, 19.99, 20.00)
	Promedio	Triangular	(19.99, 45.00, 60.00)
	Alta	Gama	(59.99, 60.01, 80.50, 90.50)
Cumplimiento del mantenimiento histórico de la estación aguas arriba - E5 (%) MH-E5	Fuera de operación	1-Gama	(0, 0.01, 9.99, 10.00)
	Bajo	Trapezoidal	(9.99, 10.01, 44.99, 45.00)
	Regular	Triangular	(44.99, 65.00, 80.00)
	Deseable	Gama	(79.99, 80.01, 99.99, 100.00)
Cumplimiento del mantenimiento histórico de la estación aguas abajo - E5A (%) MH-E5A	Fuera de operación	1-Gama	(0, 0.01, 9.99, 10.00)
	Bajo	Trapezoidal	(9.99, 10.01, 44.99, 45.00)
	Regular	Triangular	(44.99, 65.00, 80.00)
	Deseable	Gama	(79.99, 80.01, 99.99, 100.00)
Cumplimiento del mantenimiento histórico de la tubería entre las estaciones aguas arriba y abajo. (%) MH-STO	Fuera de operación	1-Gama	(0, 0.01, 9.99, 10.00)
	Bajo	Trapezoidal	(9.99, 10.01, 44.99, 45.00)
	Regular	Triangular	(44.99, 65.00, 80.00)
	Deseable	Gama	(79.99, 80.01, 99.99, 100.00)
Disponibilidad de recursos humanos para operar la estación (1:1) RH-E	Fuera de operación	1-Gama	(0,0.01,0.99,1.00)
	Baja	Trapezoidal	(0.99, 1.01,10.99,11.00)
	considerable	Triangular	(10.99, 22.00, 33.00)
	Deseable	Gama	(32.99, 33.01, 44.99,45.00)
Disponibilidad de equipo dinámico (Turbo-bombas) (1:1). TB-E	Fuera de operación	1-Gama	(0,0.01, 0.99, 1.00)
	Baja	Trapezoidal	(0.99, 1.01, 1.99, 2.00)
	considerable	Trapezoidal	(1.99, 2.01, 3.99, 4.00)
	Deseable	Gama	(3.99, 4.01, 6.99, 7.00)

Tabla 15-B

Etiquetas lingüísticas del Sub sistema 1.

Variables de Decisión (Inputs)	Etiqueta lingüística	Función de membresía	Intervalos
Disponibilidad de equipo dinámico (Turbo-bombas) (1:1). TB-E	Fuera de operación	1-Gama	(0,0.01, 0.99, 1.00)
	Baja	Trapezoidal	(0.99, 1.01, 1.99, 2.00)
	considerable	Trapezoidal	(1.99, 2.01, 3.99, 4.00)
	Deseable	Gama	(3.99, 4.01, 6.99, 7.00)
Disponibilidad de válvulas desfogue, alarmas, tanques de recirculación y almacenamiento (%) ES-E	Fuera de operación	1-Gama	(0, 0.01, 10.99, 11.00)
	Baja	Trapezoidal	(10.99, 11.01, 44.99, 45.00)
	considerable	Triangular	(44.99, 65.00, 80.00)
	Deseable	Gama	(79.99, 80.01, 99.99, 100.00)
Disponibilidad de equipos de emergencia y generadores auxiliares de energía (%) ECA-E	Fuera de operación	1-Gama	(0, 0.01, 14.99, 15.00)
	Baja	Trapezoidal	(14.99, 15.01, 44.99, 45.00)
	considerable	Triangular	(44.99, 65.00, 80.00)
	Deseable	Gama	(79.99, 80.01, 99.99, 100.00)
Disponibilidad de equipo de medición, filtración, actuadores y sensores de flujo (%) EMFI-E	Fuera de operación	1-Gama	(0, 0.01, 19.99, 20.00)
	Baja	Trapezoidal	(19.99, 20.01, 44.99, 45.00)
	considerable	Triangular	(44.99, 65.00, 80.00)
	Deseable	Gama	(79.99, 80.01, 99.99, 100.00)
Disponibilidad de válvulas de retención de línea (1:1) VR-STO	Fuera de operación	1-Gama	(0,0.01, 0.99, 1.00)
	Baja	Trapezoidal	(0.99, 1.01, 1.99, 2.00)
	considerable	Trapezoidal	(1.99, 2.01, 4.99, 5.00)
	Deseable	Gama	(4.99, 5.01, 5.99, 6.00)
Disponibilidad de válvulas de sección de línea (1:1) VS-STO	Fuera de operación	1-Gama	(0,0.01, 3.99, 4.00)
	Baja	Trapezoidal	(3.99, 4.01, 7.99, 8.00)
	considerable	Trapezoidal	(7.99, 8.01, 15.99, 16.00)
	Deseable	Gama	(15.99, 16.01, 18.99, 19.00)
Disponibilidad de trampas de envío y recibo de diablo (1:1) TD-E	Fuera de operación	1-Gama	(0,0.01, 0.99, 1.00)
	Baja	Trapezoidal	(0.99, 1.01, 1.99, 2.00)
	Deseable	Gama	(1.99, 2.01, 3.99, 4.00)
	Disponibilidad de interconexión para los sistemas de mejorador de caudal (S/N) IMF-STO	No	1-Gama
Si		Gama	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
Disponibilidad de equipos de comunicación abierta y SCADA (S/N) ECM-STO	No	1-Gama	(0, 0.01, 0.98, 0.99)
	Si	Gama	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)

Tabla 15-C

Etiquetas lingüísticas del Sub sistema 1.

Variables de Inciertas (Outputs)	Etiqueta lingüística	Función de membresía	Intervalos
E1 & E2 - Falla en equipo dinámico de la estación de bombeo aguas arriba u abajo (Envío o Recibo de Producto – Descarga u Succión) (Kg/cm ²)	Fuera de operación	1-Gama	(0, 0.1, 13.99, 14.00)
	Alta	Trapezoidal	(13.99, 14.01, 29.99, 30.00)
	Considerable	Trapezoidal	(29.99, 30.01, 69.99, 70.00)
	Baja	Gama	(69.99, 70.01, 84.99, 85.00)
E3 - Falla por comunicación operativa de la estación aguas arriba o abajo (Envío y recibo de producto). (S/N)	No (Intermitente o nula)	1-Gama	(0, 0.01, 0.98, 0.99)
	Si (Fuera de operación)	Gama	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
E4 - Falla por exceder la MAOP (Máxima presión segura para una tubería con un indicador de pérdida de metal). (S/N)	No (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.01, 0.98, 0.99)
	Si (Riesgo operativo alto)	Gama	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
E5 & E6 - Falla en determinado sensor u actuador de flujo aguas arriba o abajo (Envío o Recibo de Producto) (S/N)	No (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.01, 0.98, 0.99)
	Si (Riesgo operativo alto)	Gama	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
E7 - Falla en equipos de instrumentación y seguridad de líneas (válvulas de seccionamiento, retención, trampa de diablos, tanques de almacenamiento, equipos de trasiego y contra incendios). (S/N)	No (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.01, 0.98, 0.99)
	Si (Riesgo operativo alto)	Gama	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
E8 & E9 - Fuga en una posición de la tubería. (Robo de Hidrocarburo o fatiga del material). (S/N)	No (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.01, 0.98, 0.99)
	Si (Riesgo operativo alto)	Gama	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)

La fuzzificación comprende el proceso de transformar valores nítidos en grados de pertenencia para términos lingüísticos de conjuntos difusos. La función de pertenencia se utiliza para asociar un título a cada término lingüístico. La base de conocimiento consiste en formular las reglas difusas, con el apoyo y la experiencia de los especialistas. El método Mamdani utiliza los conceptos de conjuntos difusos y lógica difusa para traducir un conjunto completamente desestructurado de heurística lingüística en un algoritmo. El proceso de defuzzificación que utiliza el software Matlab calcula el centro de gravedad de las imágenes (método centroide) que se generan al momento de descomponer cada una de las variables de entrada lingüísticas (Montgomery, 2012). El sub Sistema 1, empleo un total de 1360 reglas difusas para representar la dinámica operativa del STO.

La confiabilidad del Sub sistema 1, se validó mediante datos obtenidos del sistema real y los estimados por el sistema difuso, con la finalidad de identificar la variabilidad entre las salidas normalizadas. La tabla 16 presenta una muestra representativa de la población de 12 escenarios de falla reales y estimados, con 600 datos definidos previamente por un diseño de experimentos factorial. La ilustración 32, presenta una vista ampliada del comportamiento de las variables, que facilita la identificación visual de su varianza.

Tabla 16

Muestra informativa del Sub sistema 1.

Variables de Salida Normalizadas del proceso Medidas & Estimadas: $e(t) = y(t) - \tilde{y}(t)$.											
Sub Sistema 1 - Programa & Instrumentación Operativa del STO.											
E1&E2	$\tilde{y}(t) = E1\&E2$	E3	$\tilde{y}(t) = E3$	E4	$\tilde{y}(t) = E4$	E5&E6	$\tilde{y}(t) = E5\&E6$	E7	$\tilde{y}(t) = E7$	E8&E9	$\tilde{y}(t) = E8\&E9$
0.1097	0.1227	1.9102	1.9177	1.1431	1.143	1.5958	1.5951	1.5382	1.538	0.3883	0.3888
0.7799	0.7000	0.5857	0.5802	1.597	1.502	0.5427	0.5467	1.8537	1.8598	0.2621	0.2754
0.8549	0.8629	1.4112	1.4178	1.5142	1.5187	0.4535	0.4638	1.1122	1.1267	0.7063	0.7061
0.1126	0.1100	0.8317	0.8576	0.1217	0.1365	0.1911	0.1965	1.8781	1.8712	1.6546	1.6577
0.7371	0.6811	0.1004	0.1001	0.5153	0.5106	0.7174	0.7191	0.5532	0.5743	1.2859	1.2802
0.4259	0.4051	0.7725	0.7973	0.3666	0.369	1.8735	1.8534	0.2981	0.2919	1.8424	1.8496
0.1739	0.1842	1.6956	1.6958	0.1616	0.167	0.2136	0.2189	1.2784	1.2703	1.087	1.0833
0.2505	0.2732	0.8187	0.8385	1.5254	1.5287	1.021	1.0213	1.2595	1.2643	1.8364	1.8487
0.1368	0.1302	1.8389	1.8576	0.3962	0.3961	0.6904	0.6634	0.1614	0.1611	0.4803	0.4868
0.5172	0.5322	1.7994	1.7583	1.8474	1.8472	1.2705	1.2619	1.9902	1.9919	1.4013	1.4087

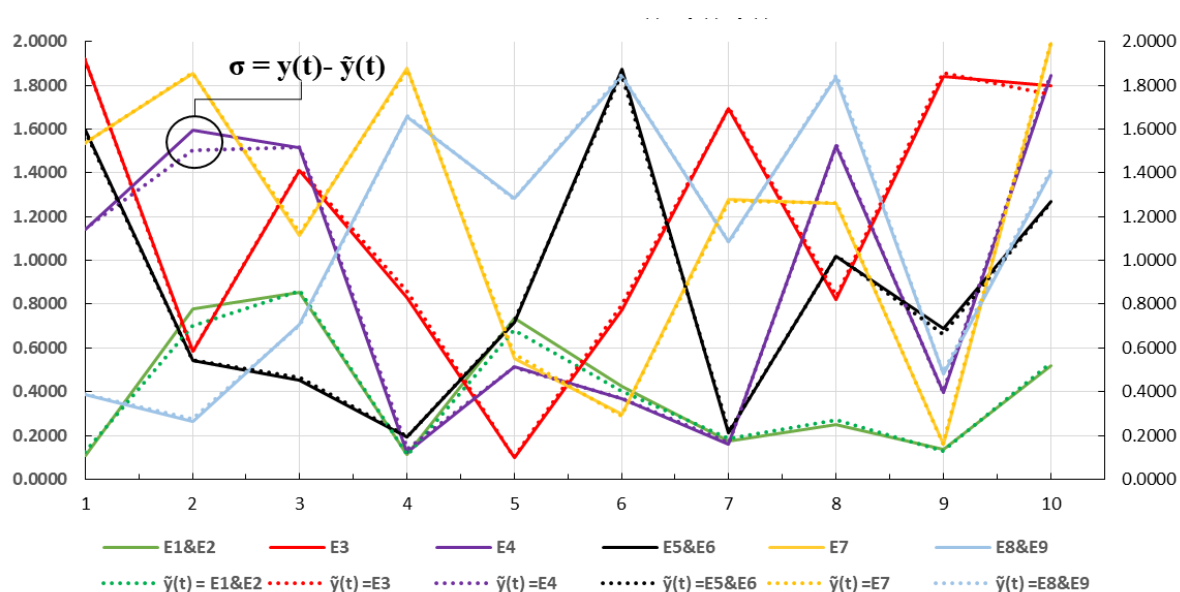


Figura 32. Varianza entre las Variables de Salida Normalizadas de los escenarios del Sub Sistema 1. Medidas & Estimadas: $e(t) = y(t) - \tilde{y}(t)$. Fuente: *Elaboración propia*.

Para determinar con exactitud la confiabilidad del Sub sistema 1, se desarrolló un análisis de regresión lineal múltiple, que facilitó la identificación del error cuadrático medio que genera el sesgo entre los escenarios de falla reales y estimados. La ilustración 33, muestra una correlación del **91.06%** entre las variables medidas y estimadas del Sub sistema 1, identificando una gran dependencia entre los componentes y un bajo sesgo de variabilidad de los mismos, lo que garantiza la confiabilidad del sistema en desarrollo.

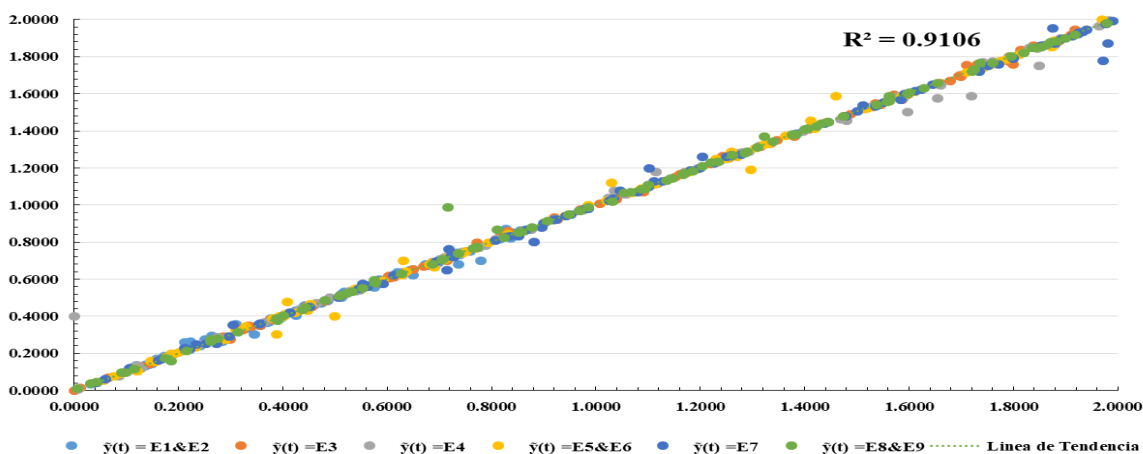


Figura 33. Análisis de regresión múltiple del Sub sistema 1. *Fuente: Elaboración propia.*

Una vez identificado el promedio de los errores cuadráticos medios, es decir, la diferencia entre el estimador y lo que se estima. Se procedió analizar el comportamiento entre las variables de entrada y salida a través de los diagramas de superficie de respuesta, los cuales representan, el comportamiento gráfico del sistema ante las reglas de inferencia difusas. La figura 34 presenta cuatro comportamientos de las variables de entrada ante la activación de un escenario de falla, como se describe a continuación:

[A] La activación del escenario de falla (E1 & E2), por condiciones de baja disponibilidad de un equipo dinámico (Turbo- bombas) en una estación aguas arriba o abajo, se minimiza cuando el equipo dinámico excede una capacidad de descarga u succión mayor a 60 Kg/cm² (CPS-E5) con indicadores de mantenimiento histórico del sistema de transporte por oleoductos (MH-STO) por encima del 40%, incrementando la fiabilidad operativa del equipo dinámico generando una baja incidencia de falla.

[B] Cuando se exceden los límites operativos permisibles de una tubería con indicadores de pérdida de metal (MAOP), el SMT a PGCG representa dicha incidencia con el escenario de falla (E4), el cual se activa por exceder la capacidad de presión de descarga promedio (55.50 Kg/cm²), establecido por la normativa ANSI / ASME B31G para una estación aguas abajo (CPD-E5A) así como una baja disponibilidad de los sistema de comunicación abierta y SCADA (ECM-STO), para controlar y monitorear las condiciones operativas del sistema, con indicadores menores a 1.0 amplifican la posibilidad de incidencia de la falla en el sistema.

[C] Representa la activación del escenario de falla (E7), Falla en equipos de instrumentación y seguridad de líneas (válvulas de seccionamiento, retención, trampa de diablos, tanques de almacenamiento, equipos de trasiego y contra incendios, activando una baja disponibilidad cuando los indicadores son decrecientes al 100% y menores a 1.0 de manera correspondiente, en las variables (ES-E) y (ECM-STO), que caracterizan los sistemas de seguridad en una estación de bombeo así como los protocolos de comunicación y control remoto del sistema. Lo que aumentaría la posibilidad de incidencia de fallo en la fase operativa del STO.

[D] La activación del escenario de falla (E8 & E9), fuga en una posición de la tubería, por conceptos de robo de Hidrocarburo o fatiga del material, se representa ante las variables (ECA-E) y (ECM-STO), vinculadas a la disponibilidad de equipos de emergencia y generadores auxiliares de energía, así como equipos de comunicación abierta y control remota del sistema ante cualquier emergencia por derrame de producto. En la cual se puede observar que con indicadores decrecientes al 100% y menores al 1.0 de manera correspondiente, en las variables (ECA-E) y (ECM-STO), potencializarían la incidencia de falla del escenario (E8 & E9) que con indicadores por encima del 1.0, establecen la incidencia de fuga de producto en alguna posición de la tubería

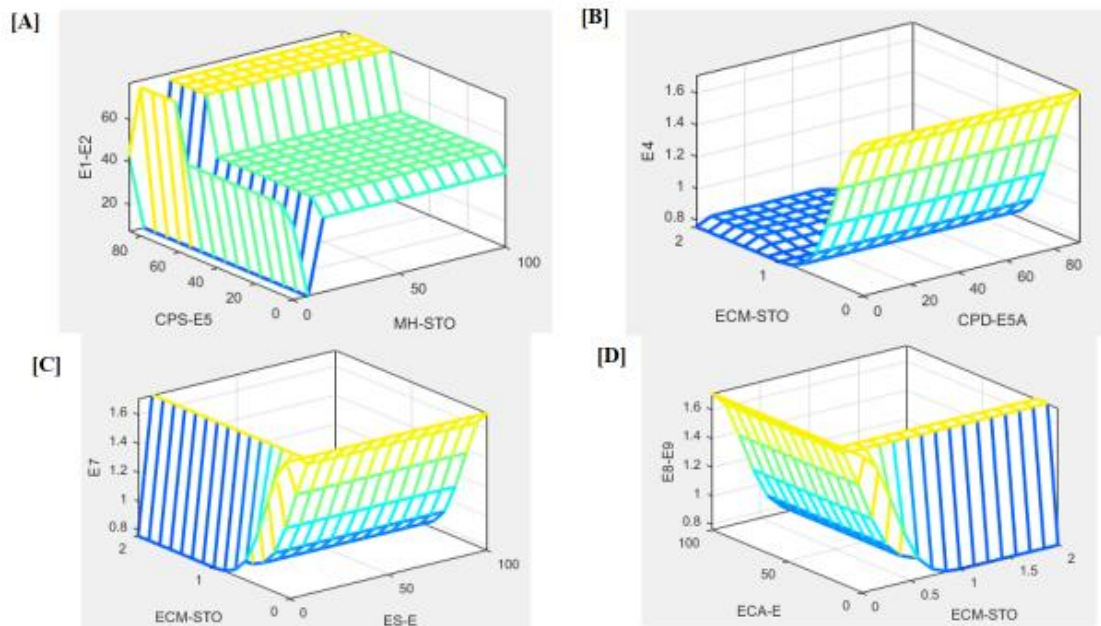


Figura 34. Diagramas de superficie de respuesta para el Sub sistema 1. *Fuente: Elaboración propia*

Cabe destacar la importancia de la variable (ECM-STO), en el comportamiento de todo el sub sistema 1, debido a que un STO, sin equipos de comunicación abierta y control remoto limita las condiciones operativas de todo el sistema. Una vez desarrolladas las pruebas de comportamiento del sub sistema 1 se procedió a estructurar el modulo inteligente en Simulink para generar un posterior enlace con el controlador principal del SMT a PCGC. Como se ilustra a continuación en la ilustración 35.

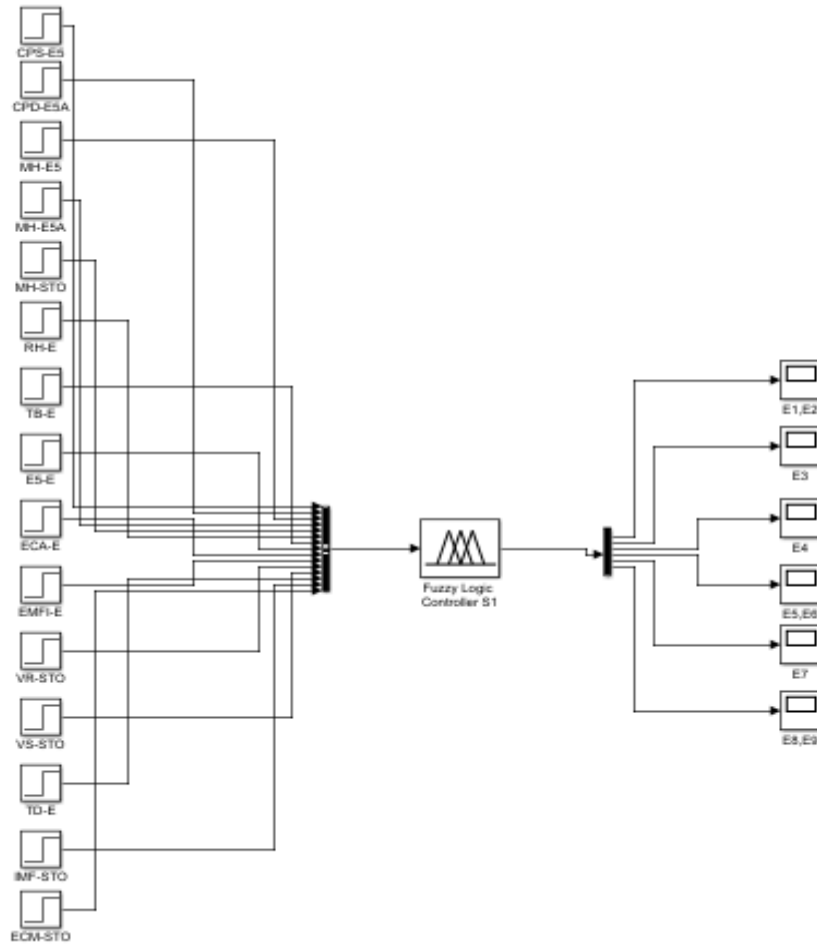


Figura 35. Estructura del Sub sistema 1 en Simulink. Fuente: *Elaboración propia.*

4.5.3.2 Diseño de los mecanismos de tolerancia del SMT a PCGC (Sub sistema 2).

Los sistemas de protección anticorrosiva (SPA), son herramientas de gran utilidad para controlar la corrosión galvánica de una superficie metálica. Se desarrollan estudios de CIPS (Close Interval Potential Survey), DCVG (Gradiente de voltaje en corriente directa), localización y retiro de puentes eléctricos con equipo PCM (pipeline current mapper), evaluación de las condiciones del recubrimiento mecánico del ducto, así como analisis del pH (Potencial de hidrogeno) y resistividad del suelo de manera longitudinal en el trazo del derecho de vía (DDV) del STO.

El conocimiento de dichos parámetros permitirá determinar un perfil del DDV, que especifique la agresividad corrosiva del suelo. La tabla 17, presenta las variables de entrada, así como los escenarios de falla del Sub sistema 2 – Sistema de protección anticorrosiva (SPA) del STO. Cabe destacar que el mecanismo de tolerancia presentado y desarrollado es de uso universal para representar el funcionamiento de un SPA, entre estaciones aguas arriba y aguas abajo, interconectadas con una longitud indeterminada por kilometraje en oleoductos.

Tabla 17

Variables de entrada y escenarios del Sub sistema 2.

Variables de Entrada.	
MH-SPA	Cumplimiento del mantenimiento histórico del SPA
RM-STO	Disponibilidad y condiciones del recubrimiento mecánico de la tubería
PC-CIPS	Nivel de protección catódica vigente – CIPS.
pH – S	Grado de acidez del suelo (pH)
R - S	Grado de agresividad del suelo en función de la resistividad (Ωcm)
Variables de Salida.	
E10	Falla en rectificador de voltaje, variabilidad de potenciales y puentes eléctricos.
E11	Falla en cama anódica, ánodos, cátodos, conexiones y conductores.
E12	Falla en recubrimiento mecánico de la tubería.
E13	Falla por agresividad corrosiva del suelo (grado del pH)
E14	Falla por resistividad corrosiva del suelo (resistencia al flujo de una carga eléctrica)

Una vez determinadas las variables de entrada con ayuda de los especialistas se procedió a desarrollar los procesos de interconexión entre los escenarios, algunos unificados por aspectos de asimilación y aplicación para una estación aguas arriba o abajo. La ilustración 36, muestra el proceso de interconexión entre las variables de entrada y los escenarios de falla mediante colorimetría en un esquema difuso de tipo Mamdani, que facilitara la modelación dinámica del conocimiento cognitivo del personal especialista y la data histórica del sistema de protección anticorrosiva del STO.

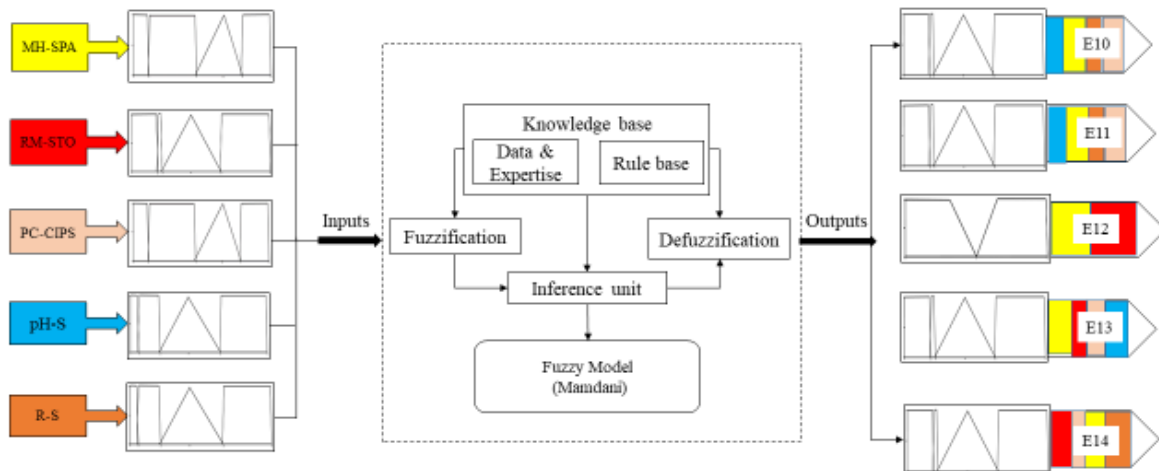


Figura 36. Arquitectura del Modelo Difuso de tipo Mamdani para Sub sistema 2.

La arquitectura del modelo difuso del sub sistema 2, está conformada por un sistema de inferencia difusa y el proceso de capitalización del conocimiento de los especialistas en protección catódica de la Industria de Petróleo y Gas, empleando información del proyecto de rehabilitación integral al sistema de protección anticorrosiva, desarrollado en el CDM, en el Oleoducto 24” – 30” Ø (pulgadas de diámetro) de (E-1) en Nuevo Teapa – (E-7) Venta de Carpio, atendiendo una longitud de 530 km. Un conjunto difuso es una forma general de conjunto nítido. Un número difuso pertenece al intervalo cerrado 0 y 1, para el cual uno se refiere a la membresía plena y el cero expresa la no membresía.

El modelo difuso consta de variables deterministas (entradas) y variables inciertas (salidas), que modelan parámetros de mantenimiento del SPA, niveles de protección catódica, así como acidez y resistividad corrosiva del suelo, interconectado a una estación aguas arriba y aguas abajo, para obtener parámetros confiables, que permitan representar la dinámica del sub sistema 2, mediante una clasificación lingüística y procesos matemáticos en un modelo Mamdani. La Tabla 18, presenta las variables del sub sistema 2, su clasificación lingüística, así como sus unidades de medida ante los escenarios de falla.

Tabla 18

Etiquetas lingüísticas del Sub sistema 2.

Variables Determinísticas (Inputs)	Etiqueta lingüística	Función de membresía	Intervalos
Cumplimiento del mantenimiento histórico del SPA – STO (%) MH-SPA	Bajo	1-Gama	(0, 0.01, 44.99, 45.00)
	Considerable Deseable	Trapezoidal Gama	(44.99, 45.01, 79.99, 80.00) (79.99, 80.01, 99.99, 100.00)
Disponibilidad y condiciones del recubrimiento mecánico de la tubería RM– STO (%)	Bajo	1-Gama	(0, 0.01, 44.99, 45.00)
	Considerable Deseable	Trapezoidal Gama	(44.99, 45.01, 84.99, 85.00) (84.99, 85.01, 99.99, 100.00)
Nivel de protección catódica vigente – CIPS - STO (%) PC - CIPS	Bajo	1-Gama	(0, 0.01, 49.99, 50.00)
	Regular Deseable	Trapezoidal Gama	(49.99, 50.01, 79.99, 80.00) (79.99, 80.01, 99.99, 100.00)
Grado de acidez del suelo– STO (pH) pH-S	pH ácido (Alta agresividad del suelo)	1-Gama	(0, 0.01, 6.98, 6.99)
	pH Neutro	Triangular Gama	(6.99, 7.00, 7.99)
	Ph Alcalino (Baja agresividad del suelo)	Gama	(7.99, 8.00, 13.99, 14.00)
Grado de agresividad del suelo en función de la resistividad – STO (Ωcm) R-S	Altamente Corrosivo	1-Gama	(0, 0.01, 999.99, 1000.00)
	Corrosivo	Trapezoidal	(999.99, 1000.01, 4999.99, 5000.00)
	Poco corrosivo	Trapezoidal	(4999.99, 5000.01, 9999.99, 10000.00)
	Muy poco corrosivo	Gama	(9999.99, 10000.01, 14999.99, 15000.00)
Variables inciertas (Outputs) E10- Falla en rectificador de voltaje, variabilidad de potenciales y puentes eléctricos. (%)	Baja (Riesgo corrosivo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 14.99, 15.00)
	Considerable Alta (Riesgo corrosivo alto)	Trapezoidal Gama	(14.99, 15.01, 74.99, 75.00) (74.99, 75.01, 99.99, 100.00)
	E11- Falla en cama anódica, ánodos, cátodos, conexiones y conductores (%).	Baja (Riesgo corrosivo bajo)	1-Gama
E12- Falla en recubrimiento mecánico de la tubería (S/N)	Considerable Alta (Riesgo corrosivo alto)	Trapezoidal Gama	(19.99, 20.01, 64.99, 65.00) (64.99, 65.01, 99.99, 100.00)
	No (Riesgo corrosivo bajo)	1-Gama	(0, 0.01, 0.98, 0.99)
E13 - Falla por agresividad corrosiva del suelo (grado del pH) (%)	Si (Riesgo corrosivo alto)	Gama	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
	Baja (Riesgo corrosivo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 9.99, 10.00)
E14 - Falla por resistividad corrosiva del suelo (resistencia al flujo de una carga eléctrica) (%)	Considerable Alta (Riesgo corrosivo alto)	Trapezoidal Gama	(9.99, 10.01, 69.99, 70.00) (69.99, 70.01, 99.99, 100.00)
	Baja (Riesgo corrosivo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 24.99, 25.00)
	Considerable Alta (Riesgo corrosivo alto)	Trapezoidal Gama	(24.99, 25.01, 79.99, 80.00) (79.99, 80.01, 99.99, 100.00)

El proceso de defuzzificación que utiliza el software Matlab calcula el centro de gravedad de las imágenes (método centroide) que se generan al momento de descomponer cada una de las variables de entrada lingüísticas. El sub Sistema 2, empleo 426 reglas difusas para representar la dinámica del SPA. Los diagramas de superficie de respuesta representan, el comportamiento grafico del sistema ante las reglas de inferencia difusas, la figura 37 presenta cuatro comportamientos de las variables de entrada ante la activación de un escenario de falla, como se describe a continuación:

[A] Se representa la activación del escenario de falla (E10), Falla en rectificador de voltaje, variabilidad de potenciales y puentes eléctricos en el sistema de protección anticorrosiva del STO, el cual demuestra un comportamiento descendente hasta un punto nulo si las variables MH-SPA y PC-CIPS, se encuentran en sus mejores indicadores de lo contrario la falla sería recurrente.

[B] La variable de potencial de hidrogeno del suelo (pH-S), demuestra que los suelos con ($\text{pH} < 5.5$), son suelos ácidos que motivan rápidamente la corrosión en un acero desnudo, el cual se amplifica con un recubrimiento mecánico deficiente en al menos un 40% de la tubería (RM-STO), generando una activación exponencial del escenario de falla (E11).

[C] En la Falla por agresividad corrosiva del suelo (E13), se puede observar como puede ser esta contralada con indicadores alcalinos de ($\text{pH} > 5.5$) y con indicadores deseables del recubrimiento mecánico de la tubería, de lo contrario se potencializa su activación.

[D] El nivel de protección catódica del STO (PC-CIPS) y la acidez del suelo que representa (pH-S), son variables determinantes para reducir el alto riesgo corrosivo que puede generar la resistividad del suelo al flujo de una carga eléctrica (E14).

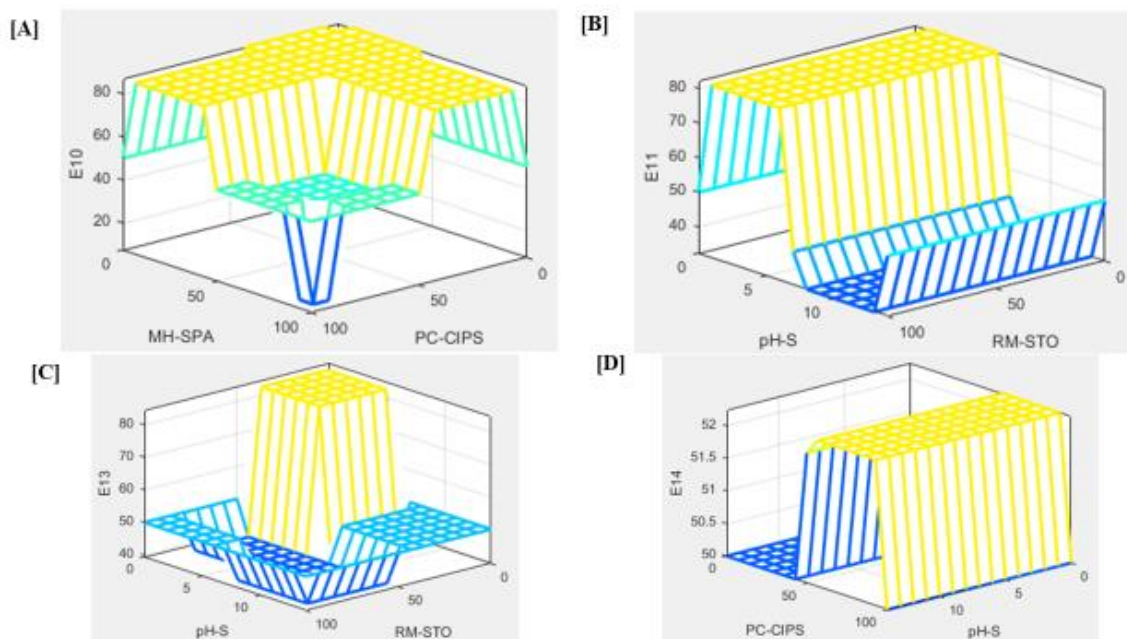


Figura 37. Diagramas de superficie de respuesta para el Sub sistema 2.

Los sistemas de protección catódica, son los encargados de combatir la corrosión en tuberías subterráneas en el mundo, sin embargo, el sub sistema 2, representa su vulnerabilidad ante suelos muy ácidos y zonas con alta oposición al flujo de una carga eléctrica, derivado a que estos sistemas emplean ánodos, cátodos, conductores y rectificadores para ser eficientes, con procesos de mantenimiento y monitoreo constantes. Una vez desarrolladas las pruebas de comportamiento del sub sistema se procedió a estructurar el modulo inteligente en Simulink para generar un posterior enlace con el control principal del SMT a PCGC. Como se ilustra a continuación en la figura 38.

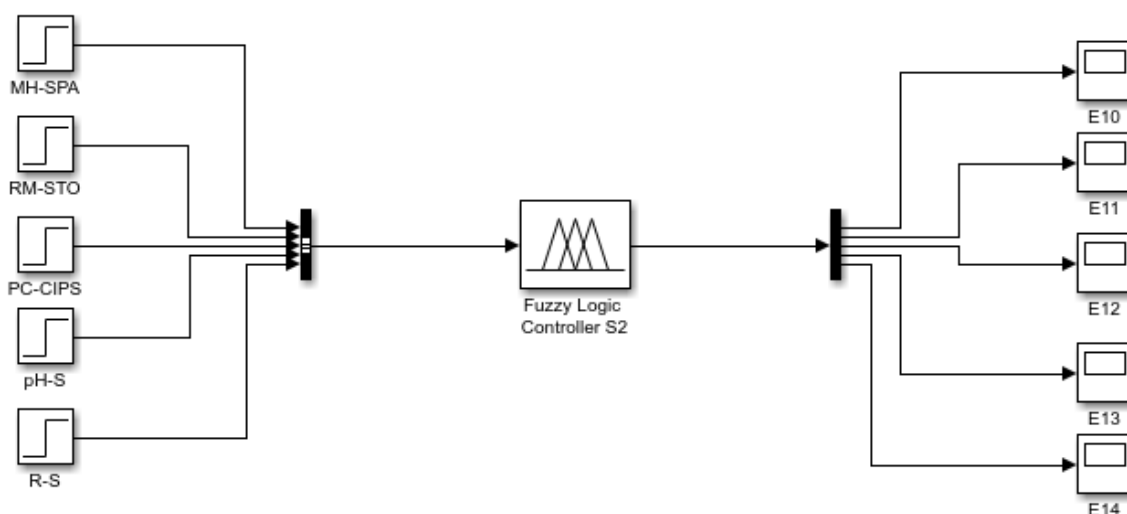


Figura 38. Estructura del Sub sistema 2 en Simulink.

4.5.3.3 Diseño de los mecanismos de tolerancia del SMT a PCGC (Sub sistema 3).

El Estudio de Integridad Mecánica (EIM), desarrollado en el STO del CDM, del tramo 9 en el Oleoducto 24” – 30” Ø, comprende los resultados del análisis de severidad de la inspección interna obtenida utilizando un equipo de inspección que emplea la tecnología de Ultrasonido de Haz Recto. El estudio ha revelado 4651 indicaciones de pérdida de metal, 151 defectos de geometría, 22 defectos a media pared y 837 anomalías registradas. El tratamiento de los datos del EIM, se enfoca en retomar las bases de datos, así como hojas de verificación de los puntos no atendidos en la sección de estudio, generando las bases para determinar el comportamiento y crecimiento de la corrosión con respecto al tiempo.

La tabla 19, presenta las variables de entrada, así como los escenarios de falla del Sub sistema 3 – Integridad Mecánica del STO. Cabe destacar que el mecanismo de tolerancia presentado y desarrollado es de uso universal para representar el comportamiento de un EIM, entre estaciones aguas arriba y aguas abajo, interconectadas con una longitud indeterminada por kilometraje en oleoductos.

Tabla 19

Variables de entrada y escenarios del Sub sistema 3.

Variables de Entrada.	
EPI	Espesor nominal de la pared interna de la tubería.
PPM del EPI	Porcentaje del defecto asociado con adelgazamiento de la pared interna de la tubería por orígenes mecánicos, de manufactura o corrosión.
DPI	Defectos en la pared interna de la tubería, asociados con discontinuidad en las capas metálicas en forma de inclusiones extrañas incrustadas en la estructura.
LIPI	Longitud de la incrustación en la pared interna de la tubería.
PARED	Afectación corrosiva de la tubería es interna (+1) o externa (-1).
FER	Factor estimado de reparación para una tubería con indicadores de pérdida de metal.
<i>P safe</i>	Presión de seguridad máxima para una tubería con una indicación de pérdida de metal.
Variables de Salida.	
E15	Falla por EPI
E16	Falla por PPM del EPI
E17	Falla por DPI
E18	Falla por LIPI
E19	Falla por PARED (Corrosión Interna o Externa)
E20	Falla por FER
E21	Falla por deterioro mecánico en una sección de la tubería.

Una vez determinadas las variables de entrada con ayuda de los especialistas se procedió a desarrollar los procesos de interconexión entre los escenarios, algunos unificados por aspectos de asimilación y aplicación para una estación aguas arriba o abajo. La ilustración 39, muestra el proceso de interconexión entre las variables de entrada y los escenarios de falla mediante colorimetría en un esquema difuso de tipo Mamdani, que facilitara la modelación dinámica del conocimiento cognitivo del personal especialista y la data histórica del EIM.

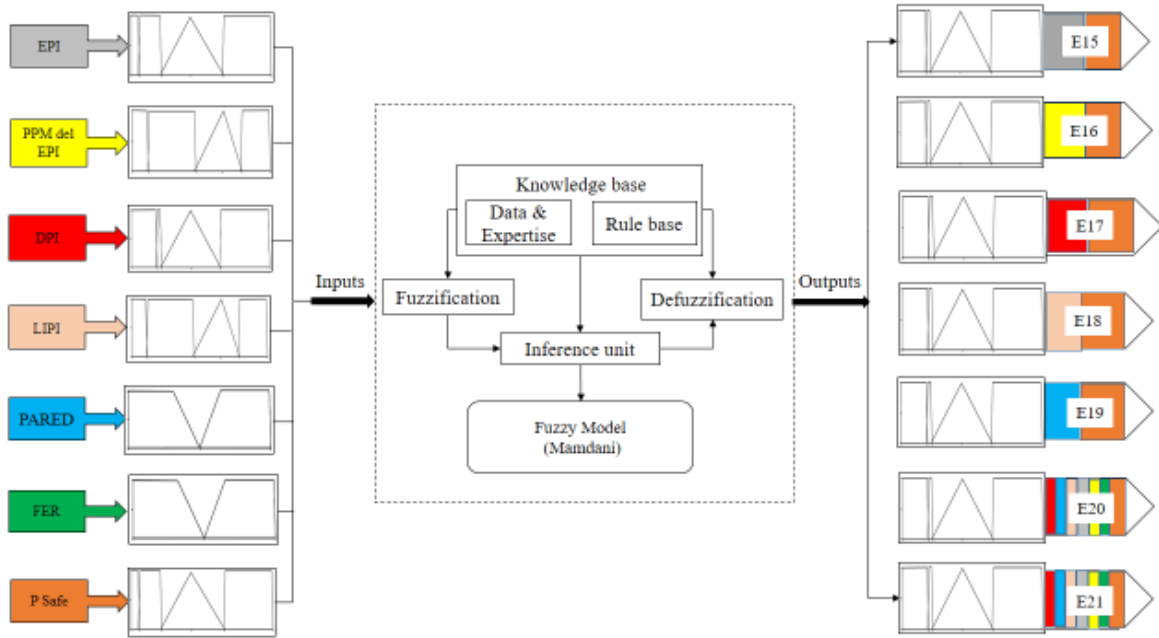


Figura 39. Arquitectura del Modelo Difuso de tipo Mamdani para Sub sistema 3.

La arquitectura del modelo difuso del sub sistema 3, está conformada por un sistema de inferencia difusa y el proceso de capitalización del conocimiento de los especialistas en corrosión e integridad mecánica de la Industria de Petróleo y Gas. El modelo difuso consta de variables deterministas (entradas) y variables inciertas (salidas), que modelan parámetros del EIM, como espesores, defectos, anomalías, incrustaciones, factores de reparación para una tubería con indicadores de pérdida de metal, interconectada a una estación aguas arriba y aguas abajo, para obtener parámetros confiables, que permitan representar la dinámica del sub sistema 3, mediante una clasificación lingüística y procesos matemáticos en un modelo Mamdani. La Tabla 20, presenta las variables del sub sistema 3, su clasificación lingüística, así como sus unidades de medida ante los escenarios de falla.

Tabla 20

Etiquetas lingüísticas del Sub sistema 3.

Variables Determinísticas (Inputs)	Etiqueta lingüística	Función de membresía	Intervalos
Espesor nominal de la pared interna de la tubería – STO (mm) EPI	Perdida Baja	1-Gama	(0, 0.01, 4.99, 5.00)
	Pérdida considerable	Trapezoidal	(4.99, 5.01, 14.99, 15.00)
	Perdida Alta	Gama	(14.99, 15.01, 19.99, 20.00)
Porcentaje del defecto asociado con adelgazamiento de la pared interna de la tubería por orígenes mecánicos, de manufactura o corrosión – STO (%) PPM del EPI	Adelgazamiento Bajo	1-Gama	(0, 0.01, 29.99, 30.00)
	Adelgazamiento Considerable Adelgazamiento Alto	Trapezoidal Gama	(29.99, 30.01, 59.99, 60.00) (59.99, 60.01, 99.99, 100.00)
Defectos en la pared interna de la tubería, asociados con discontinuidad en las capas metálicas en forma de inclusiones extrañas incrustadas en la estructura.- STO (mm) DPI	Discontinuidad Baja	1-Gama	(0, 0.01, 1999.99, 2000.00)
	Discontinuidad considerable	Trapezoidal	(1999.99, 2000.01, 3999.99, 4000.00)
	Discontinuidad Alta	Gama	(3999.99, 4000.01, 7999.99, 8000.00)
Longitud de la incrustación en la pared interna de la tubería. – STO (mm) LIP	Pequeña (Bajo riesgo de fractura)	1-Gama	(0, 0.01, 999.99, 1000.00)
	Considerable	Triangular	(999.99, 1500.00, 2000.00)
	Amplia (Alto riesgo de fractura)	Gama	(1999.99, 2000.01, 2999.99, 3000.00)
Afectación corrosiva de la tubería es interna (+1) o externa (-1) – STO (+/-) PARED	Interna (+)	1-Gama	(0, 0.01, 00.99, 1.00)
	Externa (-)	Gama	(0, -0.01, -00.99, -1.00)
Factor estimado de reparación para una tubería con indicadores de pérdida de metal – STO (1:1) FER	<1 (Menor que uno – FER Bajo)	1-Gama	(0, 0.01, 00.99, 1.00)
	>1 (Mayor que uno – FER Alto)	Gama	(00.99, 1.01, 2.99, 3.00)
Presión de seguridad máxima para una tubería con una indicación de pérdida de metal– STO (Kg/cm ²) P safe	P safe - Baja	1-Gama	(0, 0.01, 19.99, 20.00)
	P Safe – Confiable	Triangular	(19.99, 45.00, 60.00)
	P Safe – Crítica	Gama	(59.99, 60.01, 80.50, 90.50)
Variables inciertas (Outputs) E15- Falla por EPI (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 24.99, 25.00)
	Considerable	Trapezoidal	(24.99, 25.01, 74.99, 75.00)
	Crítica (Riesgo operativo alto)	Gama	(74.99, 75.01, 99.99, 100.00)
E16- Falla por PPM del EPI (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 19.99, 20.00)
	Considerable	Trapezoidal	(19.99, 20.01, 64.99, 65.00)
	Crítica (Riesgo operativo alto)	Gama	(64.99, 65.01, 99.99, 100.00)
E17- Falla por LIP (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 29.99, 30.00)
	Considerable	Trapezoidal	(29.99, 30.01, 64.99, 65.00)
	Crítica (Riesgo operativo alto)	Gama	(64.99, 65.01, 99.99, 100.00)
E18 - Falla por ANPI (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 39.99, 40.00)
	Considerable	Trapezoidal	(39.99, 40.01, 79.99, 80.00)
	Crítica (Riesgo operativo alto)	Gama	(79.99, 80.01, 99.99, 100.00)
E19 - Falla por PARED (Corrosión Interna o Externa) (%)	Bajo concentrado corrosivo (Riesgo operativo mínimo)	1-Gama	(0, 0.1, 29.99, 30.00)
	Concentrado corrosivo notable	Trapezoidal	(29.99, 30.01, 69.99, 70.00)
	Concentrado corrosivo abundante (Riesgo operativo alto)	Gama	(69.99, 70.01, 99.99, 100.00)
E20 - Falla por FER (%)	FER-Bajo (Riesgo operativo mínimo)	1-Gama	(0, 0.1, 24.99, 25.00)
	FER-Considerable	Trapezoidal	(24.99, 25.01, 59.99, 60.00)
	FER-Alto (Riesgo operativo crítico)	Gama	(59.99, 60.01, 99.99, 100.00)
E21 - Falla por deterioro mecánico en una sección de la tubería (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 29.99, 30.00)
	Considerable	Trapezoidal	(29.99, 30.01, 59.99, 60.00)
	Crítica (Riesgo operativo alto)	Gama	(59.99, 60.01, 99.99, 100.00)

El proceso de defuzzificación que utiliza el software Matlab calcula el centro de gravedad de las imágenes (método centroide) que se generan al momento de descomponer cada una de las variables de entrada lingüísticas. El sub Sistema 3, empleo 681 reglas difusas para representar la dinámica del EIM. Los diagramas de superficie de respuesta representan, el comportamiento grafico del sistema ante las reglas de inferencia difusas, la ilustración 40 presenta cuatro comportamientos de las variables de entrada ante la activación de un escenario de falla, como se describe a continuación:

[A] Se representa como el escenario de falla espesor de la pared interna de la tubería (E15), mantiene un vínculo estrecho, con el porcentaje de pérdida de metal (PPM-EPI) y la presión máxima segura para tuberías con indicadores de pérdida de metal (P-Safe), la cual al ascender aumenta el riesgo de activación de falla para dicho escenario.

[B] Demuestra nuevamente como las variables (PPM-EPI) y (P-Safe), mantienen un alto factor de impacto ante escenarios relacionados con porcentajes de pérdida de metal en las paredes internas de la tubería (E16), recalcando la importancia de no exceder los límites permisibles seguros.

[C] Se representa el comportamiento del escenario de falla por amplitud de la pared interna de la tubería (E18), el cual demuestra una vinculación directa con (EPI) y (LIPI), esta última indicando que si la incrustación está por encima de los 1000 mm, generara un alto riesgo de fractura para la tubería.

[D] El escenario de falla del Factor estimado de reparación (E20), establece la relación porcentual de reparación para una determinada sección de la tubería, con un vínculo directo de activación si el ($FER > 1$), en donde la afectación de la (PARED) interna (0 a 1) o externa (o a -1), no minimiza factores de riesgos operativos por fractura de la tubería.

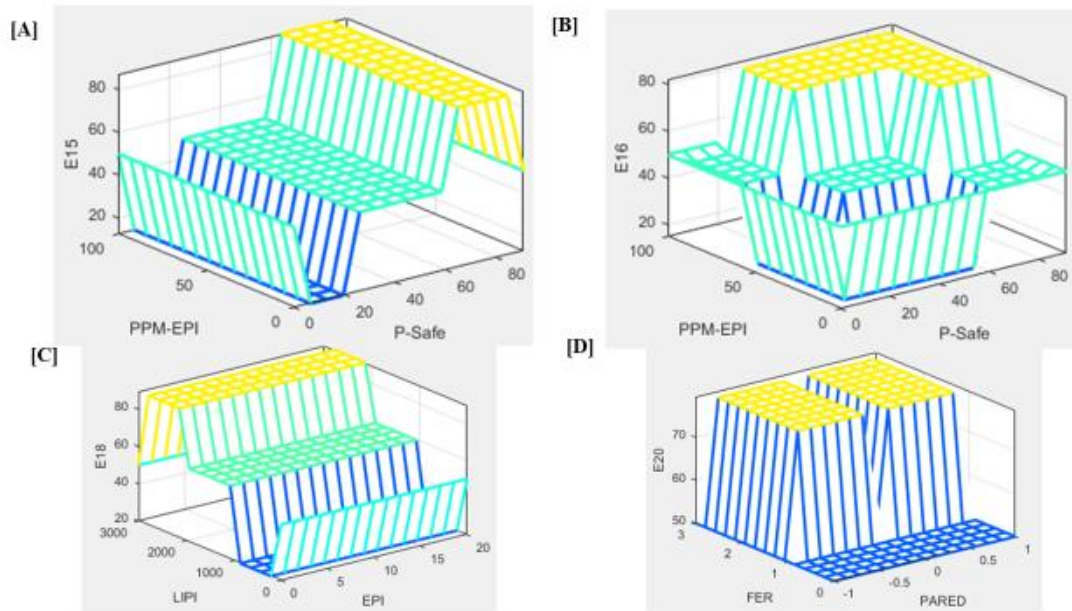


Figura 40. Diagramas de superficie de respuesta para el Sub sistema 3.

La importancia de respetar los límites operativos permisibles para tuberías con indicadores de pérdida de metal (P-Safe) y el mantener controladas las secciones con mayor (FER), son determinantes para el adecuado funcionamiento del sub sistema 3. Una vez desarrolladas las pruebas de comportamiento del sub sistema se procedió a estructurar el modulo inteligente en Simulink para generar un posterior enlace con el control principal del SMT a PCGC. Como se ilustra a continuación en la figura 41.

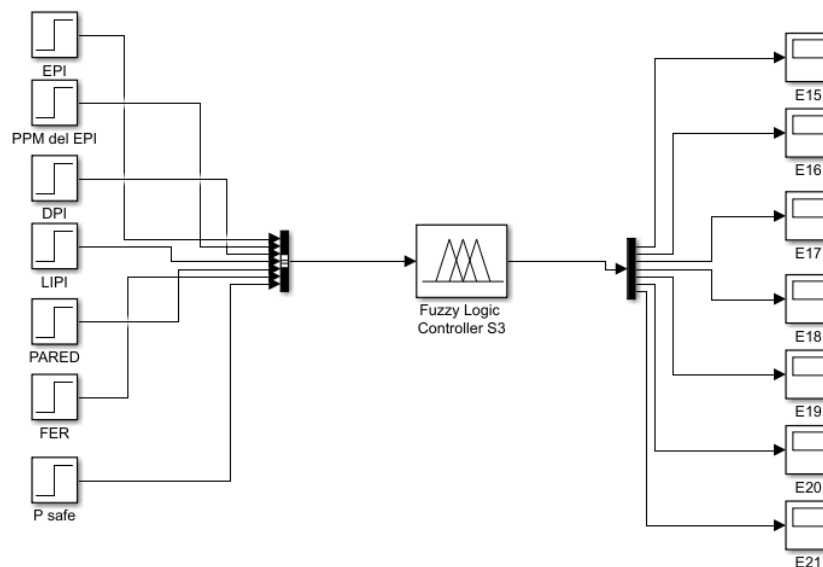


Figura 41. Estructura del Sub sistema 3 en Simulink.

4.5.3.4 Diseño de los mecanismos de tolerancia del SMT a PCGC

(Sub sistema 4).

Representa la dinámica de un análisis metalográfico robusto de un oleoducto subterráneo fuera de servicio por cuestiones de fallo estructural. A través de este análisis, se gestiona el conocimiento generacional de patrones corrosivos en oleoductos terrestres, con el fin de fortalecer áreas del campo de estudio. El sub sistema interpreta comportamientos metalográficos, análisis de rugosidad, medición de espesores y corrosión por ultrasonido, así como ensayos de tracción de la muestra, con el fin de conocer la composición del material, su resistencia y sus condiciones físicas. Tras el análisis de las pruebas de laboratorio, las características físicas y químicas se compararon con las regulaciones nacionales e internacionales, lo que permitió una caracterización específica de las condiciones de la muestra con un acero API L X65.

La tabla 21, presenta las variables de entrada, así como los escenarios de falla del Sub sistema 4 – Análisis Metalográfico. Cabe destacar que el mecanismo de tolerancia presentado y desarrollado es de uso universal para representar el comportamiento de las diversas pruebas y ensayos de laboratorio, que representan la caracterización mecánica, física y química de un oleoducto subterráneo con afectaciones corrosivas.

Tabla 21

Variables de entrada y escenarios del Sub sistema

Variables de Entrada.	
SMYS	Límite elástico específico del acero para una tubería
P-FD	Presión interna establecida por el Factor de diseño en una tubería
TG	Tamaño de grano del acero mediante ASTM E-112
FFP	Fase ferrita-perlita del acero de la tubería.
GA	Grado del acero en la tubería mediante ASTM E8/E8M
DA	Caracterización mecánica de la dureza del acero mediante ASTM E-92, 18 y 140
AMT	Alteración en la microestructura del material de la tubería por efectos corrosivos entre cavidades.
Variables de Salida.	
E22	Falla por exceder el SMYS (Límite elástico especificado del material de la tubería).
E23	Falla por exceder la presión interna establecida por el FD (Factor de diseño de la tubería).
E24	Falla por alteración en el tamaño de grano de material de la tubería
E25	Falla por alteración en la composición química del material de la tubería
E26	Falla por alteraciones a las propiedades físicas y elásticas del material de la tubería.
E27 & 28	Falla por alteración micro geométrico del material en la tubería. (Agrietamiento y Cavidades).

Una vez determinadas las variables de entrada con ayuda de los especialistas se procedió a desarrollar los procesos de interconexión entre los escenarios, algunos unificados por aspectos de asimilación y aplicación para una estación aguas arriba o abajo.

La ilustración 42, muestra el proceso de interconexión entre las variables de entrada y los escenarios de falla mediante colorimetría en un esquema difuso de tipo Mamdani, que facilitara la modelación dinámica de las pruebas de laboratorio y ensayos.

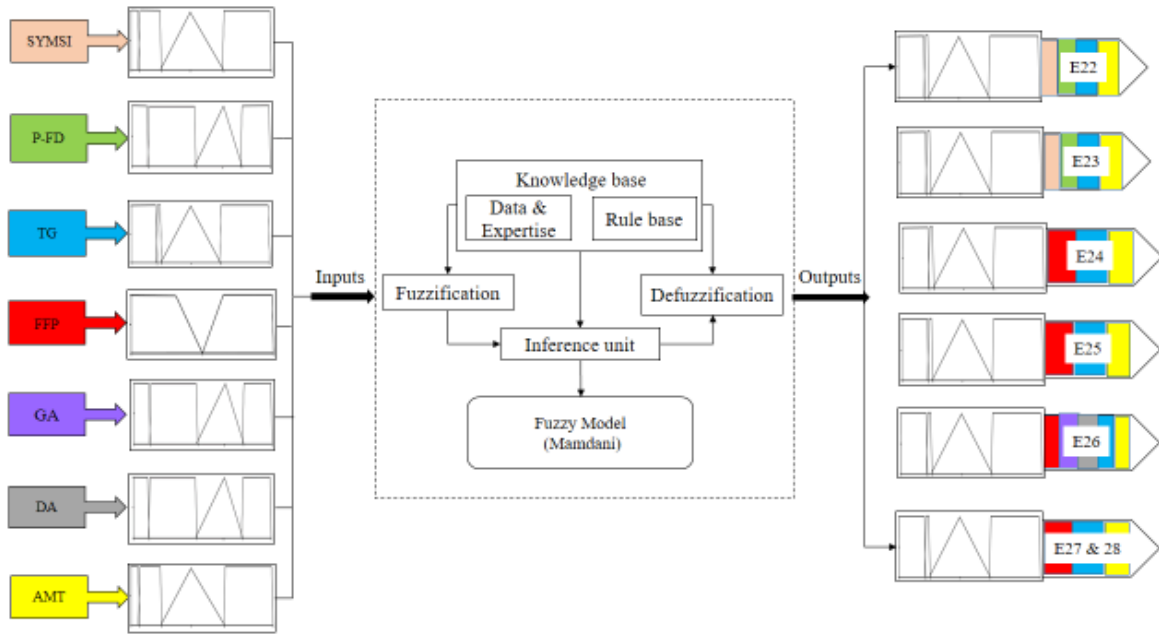


Figura 42. Arquitectura del Modelo Difuso de tipo Mamdani para Sub sistema 4.

La arquitectura del modelo difuso del sub sistema 4, está conformada por un sistema de inferencia difusa y el proceso de capitalización del conocimiento de los especialistas metalurgia. El modelo difuso consta de variables deterministas (entradas) y variables inciertas (salidas), para obtener parámetros confiables, que permitan representar la dinámica del sub sistema 4, mediante una clasificación lingüística y procesos matemáticos en un modelo Mamdani. La Tabla 22, presenta las variables del sub sistema 4, su clasificación lingüística, así como sus unidades de medida ante los escenarios de falla.

Tabla 22

Etiquetas lingüísticas del Sub sistema 4.

Variables Determinísticas (Inputs)	Etiqueta lingüística	Función de membresía	Intervalos
Límite elástico específico del acero para una tubería – STO (MPa) SMYS	Mínima	1-Gama	(0, 0.01, 449.99, 450.00)
	Promedio	Trapezoidal	(449.99, 450.01, 599.99, 600.00)
	Máxima	Gama	(599.99, 600.01, 749.99, 750.00)
Presión interna establecida por el Factor de diseño en una tubería – STO (Kg/cm ²) P-FD	P-FD - Baja	1-Gama	(0, 0.01, 19.99, 20.00)
	P-FD – Confiable	Trapezoidal	(19.99, 20.01, 59.99, 60.00)
	P-FD – Crítica	Gama	(59.99, 60.01, 80.50, 90.50)
Tamaño de grano del acero mediante ASTM E-112.- STO (1:1) TG	TG-Grande (R-)	1-Gama	(0, 0.01, 3.99, 4.00)
	TG-Promedio (Rp)	Trapezoidal	(3.99, 4.01, 10.99, 11.00)
	TG-Pequeño (R+)	Gama	(10.99, 11.01, 13.99, 14.00)
Fase ferrita-perlita del acero de la tubería – STO (%) FPP	FFP-heterogénea (Alto riesgo de fractura)	1-Gama	(0, 0.01, 49.99, 50.00)
	FFP-homogénea (Bajo riesgo de fractura)	Gama	(49.99, 50.01, 99.99, 100.00)
Grado del acero en la tubería mediante ASTM E8/E8M – STO (MPa) GA	Mínimo	1-Gama	(0, 0.01, 534.99, 535.00)
	Promedio	Trapezoidal	(534.99, 535.01, 759.99, 760.00)
	Máximo	Gama	(759.99, 760.01, 984.99, 985.00)
Caracterización mecánica de la dureza del acero mediante ASTM E-92, 18 y 140 – STO (HRB) DA	Dureza baja	1-Gama	(0, 0.01, 50.99, 51.00)
	Dureza Promedio	Trapezoidal	(50.99, 51.01, 85.99, 86.00)
	Dureza Máxima	Gama	(85.99, 86.01, 109.99, 110.00)
Alteración de la microestructura de la tubería por efectos corrosivos entre cavidades – STO (µin) AMT	Variabilidad entre cavidades – Baja (%PMB)	1-Gama	(0, 0.01, 599.99, 660.00)
	Variabilidad entre cavidades – Considerable (%PMC)	Trapezoidal	(599.99, 660.01, 1049.99, 1050.00)
	Variabilidad entre cavidades – Alta (%PMA)	Gama	(1049.99, 1050.01, 1599.99, 1600.00)
Variables inciertas (Outputs) E22- Falla por exceder el SMYS (Límite elástico especificado del material de la tubería) (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 24.99, 25.00)
	Considerable	Trapezoidal	(24.99, 25.01, 74.99, 75.00)
	Crítica (Riesgo operativo alto)	Gama	(74.99, 75.01, 99.99, 100.00)
E23- Falla por exceder la presión interna establecida por el FD (Factor de diseño de la tubería) (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 19.99, 20.00)
	Considerable	Trapezoidal	(19.99, 20.01, 64.99, 65.00)
	Crítica (Riesgo operativo alto)	Gama	(64.99, 65.01, 99.99, 100.00)
E24- Falla por alteración en el tamaño de grano de la tubería (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 29.99, 30.00)
	Considerable	Trapezoidal	(29.99, 30.01, 64.99, 65.00)
	Crítica (Riesgo operativo alto)	Gama	(64.99, 65.01, 99.99, 100.00)
E25 - Falla por alteración en la composición química del material de la tubería (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 39.99, 40.00)
	Considerable	Trapezoidal	(39.99, 40.01, 79.99, 80.00)
	Crítica (Riesgo operativo alto)	Gama	(79.99, 80.01, 99.99, 100.00)
E26 - Falla por alteraciones a las propiedades físicas y elásticas del material de la tubería (s/mm)	Tiempo de elongación bajo (Riesgo operativo alto)	1-Gama	(0, 0.1, 59.99, 60.00)
	Tiempo de elongación considerable	Trapezoidal	(59.99, 60.01, 95.99, 96.00)
	Tiempo de elongación deseable (Riesgo operativo mínimo)	Gama	(95.99, 96.01, 139.99, 140.00)
	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 24.99, 25.00)
E27 & 28 - Falla por alteración micro geométrico del material en la tubería. (Agrietamiento y Cavidades). (%)	Considerable	Trapezoidal	(24.99, 25.01, 59.99, 60.00)
	Crítica (Riesgo operativo alto)	Gama	(59.99, 60.01, 99.99, 100.00)

El proceso de defuzzificación que utiliza el software Matlab calcula el centro de gravedad de las imágenes (método centroide) que se generan al momento de descomponer cada una de las variables de entrada lingüísticas. El sub Sistema 4, emplea 579 reglas difusas para representar la dinámica del estudio. Los diagramas de superficie de respuesta representan, el comportamiento gráfico del sistema ante las reglas de inferencia difusas, la ilustración 43 presenta cuatro comportamientos de las variables de entrada ante la activación de un escenario de falla, como se describe a continuación:

[A] Se representa la activación del escenario de falla por exceder el SMYS (Límite elástico especificado del material de la tubería) (E22), cuando la Fase ferrita-perlita del acero de la tubería (FFP), entra en procesos heterogéneos (Alto riesgo de fractura 0 a 50 %) y consideramos un TG-Grande, donde la resistencia de la tubería será mínima.

[B] Las alteraciones al tamaño de grano en la tubería se representan en el escenario de falla (E24), donde si la (FFP) considera procesos homogéneos (Bajo riesgo de fractura 50.1 a 100%) junto a una baja variabilidad entre cavidades del material por efectos corrosivos (AMT), el factor de riesgo por alteraciones a la microestructura del material de la tubería sería minimizado.

[C] El cambio en la microestructura del material por efectos corrosivos se representa en el (E25), la cual a una baja variabilidad entre cavidades de la tubería (AMT) y tamaño de grano pequeño, reducen la activación de dicho escenario.

[D] La falla por alteración micro geométrica del material en la tubería. (Agrietamiento y Cavidades) (E27 & 28), se puede observar como es modificada por altos indicadores de variabilidad entre cavidades (AMT) y gran tamaño de grano que reflejan una baja resistencia del material de la tubería a la fractura.

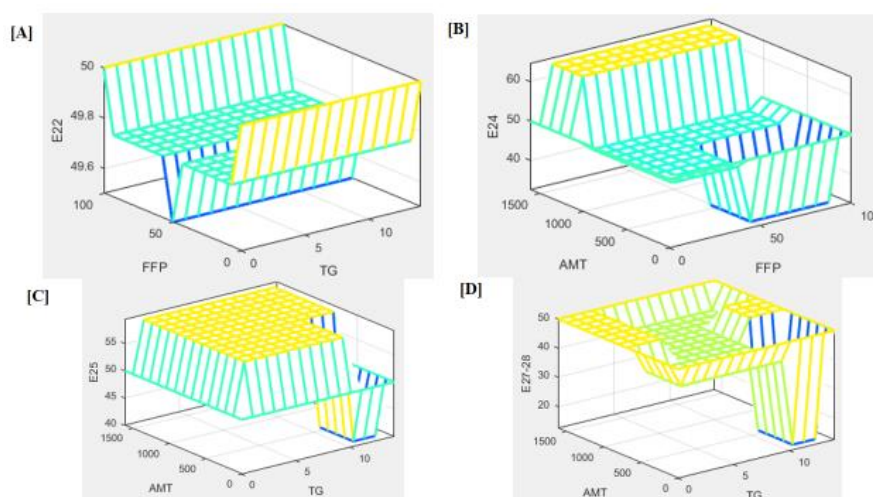


Figura 43. Diagramas de superficie de respuesta para el Sub sistema 4

La corrosión genera diversas alteraciones en la microestructura de un material lo que hace que sea susceptible a procesos de fractura, como se pudo observar en el sub sistema 4. Una vez desarrolladas las pruebas de comportamiento del sub sistema se procedió a estructurar el modulo inteligente en Simulink para generar un posterior enlace con el control principal del SMT a PCGC. Como se ilustra a continuación en la figura 44.

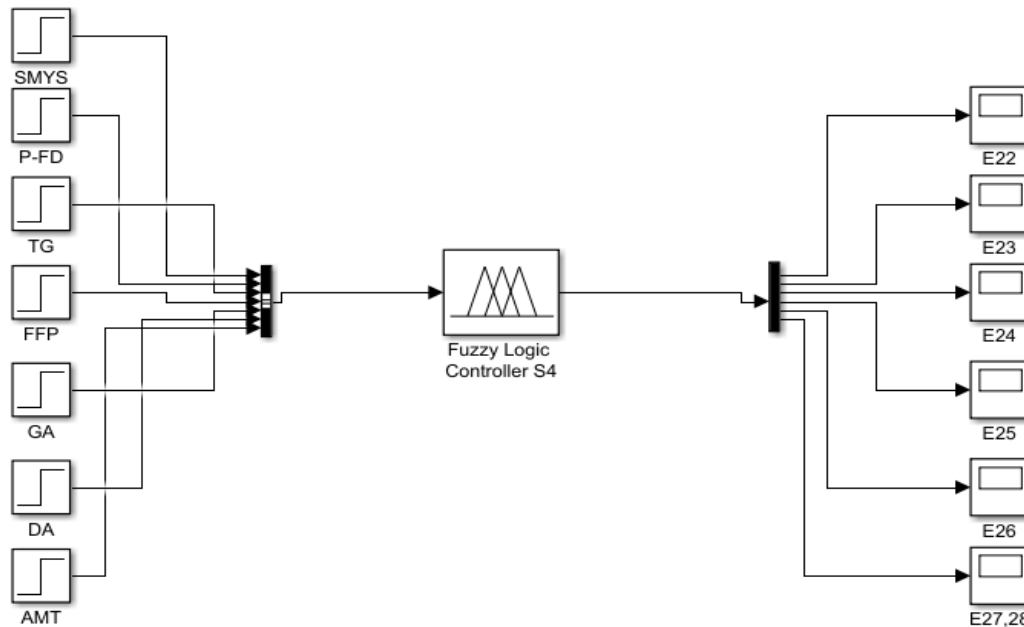


Figura 44. Estructura del Sub sistema 4 en Simulink.

4.5.3.5 Discusión, Resultados y Conclusiones de los mecanismos de tolerancia.

Un gráfico de valores atípicos, identifica las características de los componentes que numéricamente son distintos del resto de los datos. Los valores atípicos pueden afectar significativamente los resultados de su análisis. Por lo tanto, si identifica un valor atípico en los datos, debe examinar la observación para determinar por qué se trata de un valor poco común (Minitab, 2017). El análisis se desarrolló mediante los 4 sub sistemas con 48 escenarios de falla reales y estimados que conforman el SMT a PCGC, con 4800 datos. El grafico nos indica que existen diversos valores atípicos por encima del sesgo de aglomeración de referencia, lo que representa ajustes al sistema, como se muestra a continuación en la ilustración 45.

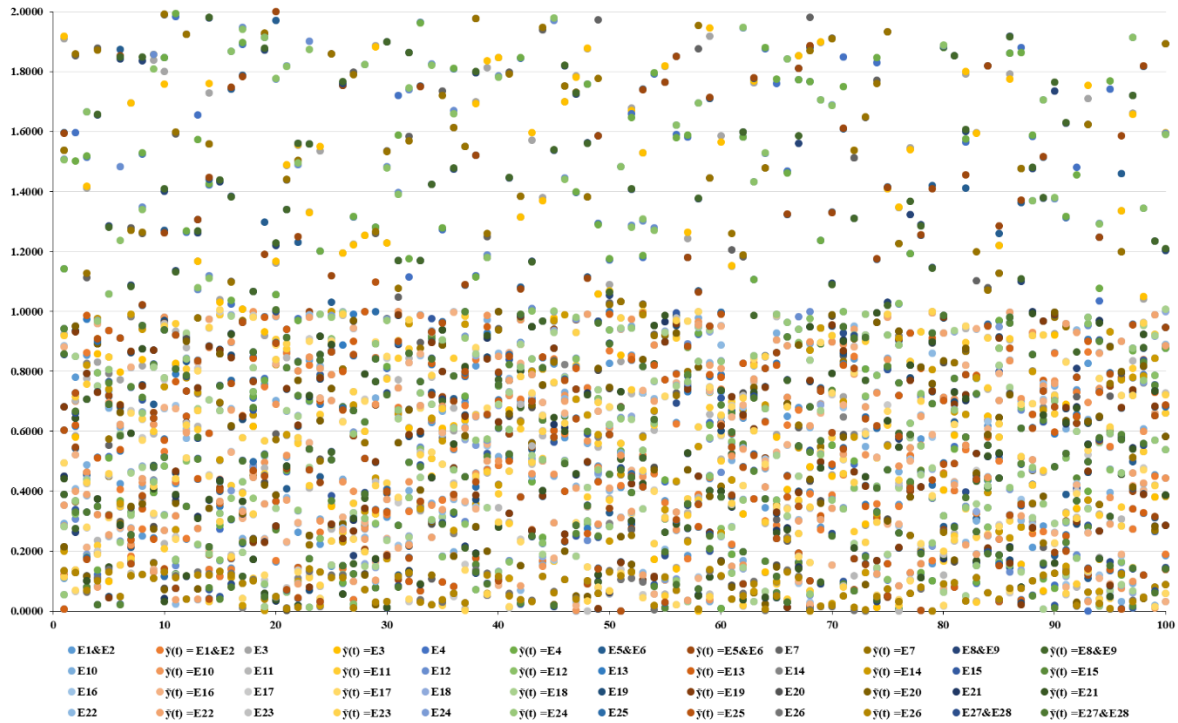


Figura 45. Gráfico de los valores atípicos de los escenarios de falla de los sub sistemas 1 al 4. *Fuente:*
Elaboración propia

El análisis de regresión múltiple, representa un diagrama matemático que utiliza las coordenadas cartesianas para mostrar los valores de dos o más variables para un conjunto de datos (Minitab, 2017). La grafica permite evaluar la correlación, entre los componentes principales de los sub sistemas. La ilustración 46, muestra los valores obtenidos por el análisis de regresión múltiple de los sub sistemas 1 al 4, con valores de **91.06%**, **94.55%**, **96.07%** & **93.97%** respectivamente, de igual forma se presenta una correlación del **93.57%** entre las variables de los sub sistemas del SMT a PCGC, que estiman un valor promedio de la confiabilidad total del sistema.

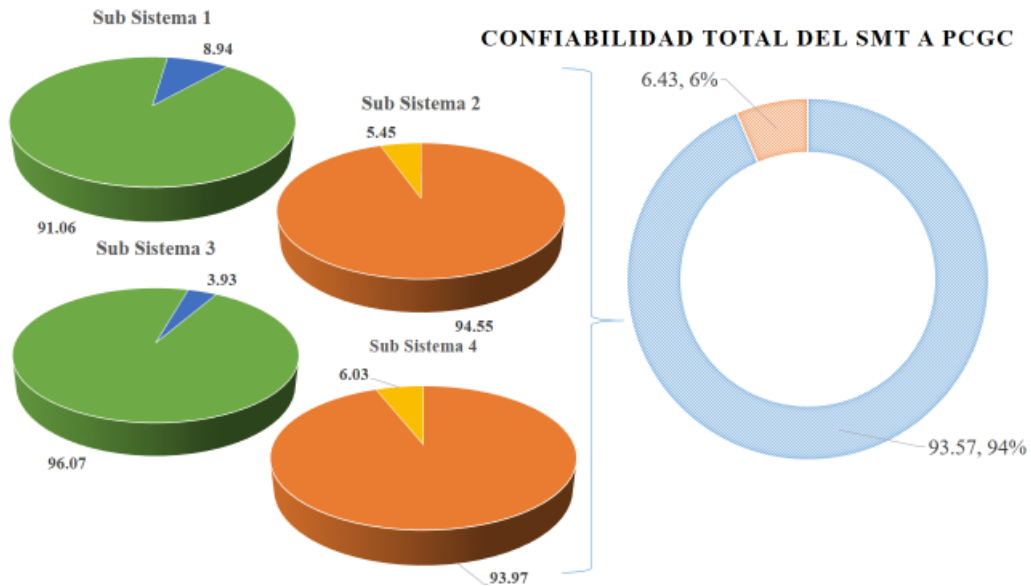


Figura 46. Análisis de regresión múltiple de los sub sistemas 1 al 4. Fuente: *Elaboración propia.*

La ilustración 47, muestra una correlación del **93.57%** entre las variables medidas y estimadas del SMT a PCGC, determinando un bajo sesgo de variabilidad, no obstante, los ajustes a los parámetros y reglas del sistema difuso, permitirán maximizar la confiabilidad del sistema inteligente.

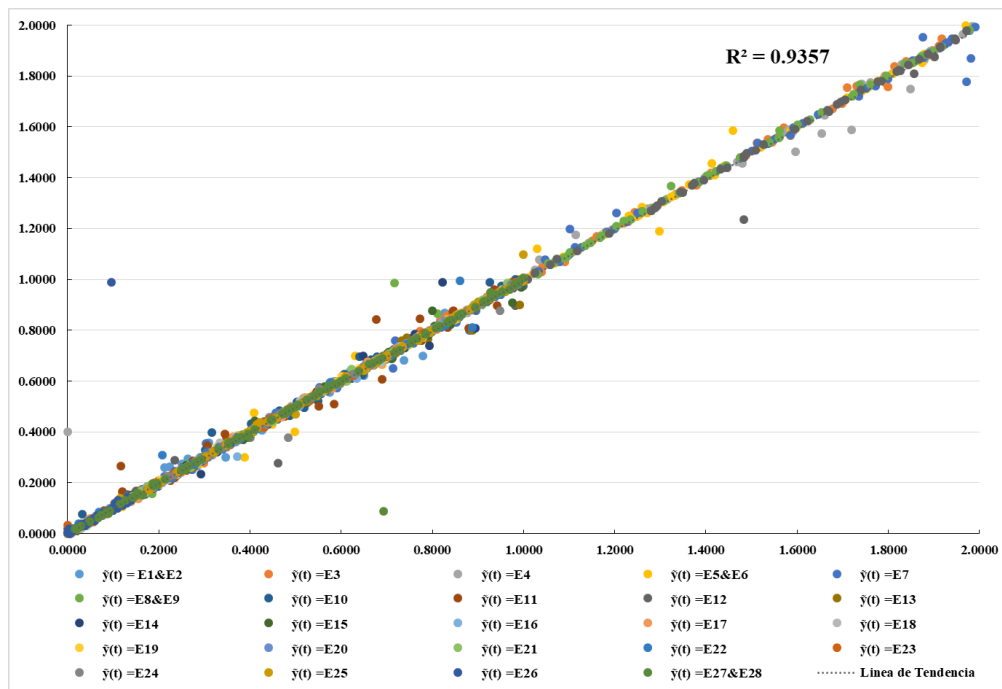


Figura 47. Análisis de regresión múltiple de los sub sistemas 1 al 4. Fuente: *Elaboración propia.*

El SMT a PCGC, estandariza procedimientos de comunicación entre los sub sistemas y su control principal, a través de sus variables de salida medidas y las estimadas, mediante un proceso de normalización binaria de sus datos, identificando fallas localizadas y dirigidas, gestionando de esta forma un sistema de apoyo al operador humano, confiable ante procesos de incertidumbre operativa. Por cuestiones de longitud del reporte doctoral, solo se presenta el desarrollo del sistema difuso del Sub sistema 1 así como los resultados de confiabilidad en los sub sistemas restantes, por consiguiente, se trabaja en la conexión del controlador principal neuro difuso con los sub sistemas, así como la aplicación de un algoritmo genético para gestionar la reducción de incidencia en los escenarios de falla que representan un riesgo protuberante para el sistema.

4.5.4 Supervisión y Aplicación.

4.5.4.1 Interconexión de los Sub sistemas con el Control principal del SMT a PCGC.

Para establecer una interconexión estable entre los subsistemas y el flujo de la información sea correcta en el SMT a PCGC, se procedió a desarrollar un controlador neuro-difuso, con la finalidad de estandarizar procesos de comunicación entre los sub sistemas y el controlador principal, debido a las capacidades de adaptación dinámicas que ofrecen estos sistemas, alimentado de las variables de salida generadas por los escenarios de falla facilitarían el proceso de decisiones del STO. el proceso de selección y normalización de las etiquetas lingüísticas de las variables inciertas (outputs) y determinísticas (inputs) se muestra a continuación en la tabla 23 A, B & C.

Tabla 23 A

Etiquetas lingüísticas de las variables inciertas de los Sub sistemas.

VARIABLES INCIERTAS (Outputs)	Etiqueta lingüística	Función de membresía	Intervalos	Normalización
E1 & E2- Falla en equipo dinámico de la estación de bombeo aguas arriba u abajo (Envío o Recibo de Producto – Descarga u Succión) (Kg/cm ²)	Fuera de operación	1-Gama	(0, 0.1, 13.99, 14.00)	(0, 0.001, 0.1399, 0.1400)
	Alta	Trapezoidal	(13.99, 14.01, 29.99, 30.00)	(0.1399, 0.1401, 0.2999, 0.3000)
	Considerable	Trapezoidal	(29.99, 30.01, 69.99, 70.00)	(0.2999, 0.3001, 0.6999, 0.7000)
	Baja	Gama	(69.99, 70.01, 84.99, 85.00)	(0.6999, 0.7001, 0.8499, 0.8500)
E3- Falla por comunicación operativa de la estación aguas arriba o abajo (Envío y recibo de producto). (S/N)	No (Intermitente o nula)	1-Gama	(0, 0.01, 0.98, 0.99)	(0, 0.01, 0.98, 0.99)
	Si (Fuera de operación)	Gama	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)

Tabla 23 B

Etiquetas lingüísticas de las variables inciertas de los Sub sistemas.

VARIABLES INCERTAS (Outputs)	Etiqueta lingüística	Función de membresía	Intervalos	Normalización
E4 - Falla por exceder la MAOP (Máxima presión segura para una tubería con un indicador de pérdida de metal). (S/N)	No (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.01, 0.98, 0.99)	(0, 0.01, 0.98, 0.99)
	Si (Riesgo operativo alto)	Gama	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
E5 & E6 - Falla en determinado sensor u actuador de flujo aguas arriba o abajo (Envío o Recibo de Producto) (S/N)	No (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.01, 0.98, 0.99)	(0, 0.01, 0.98, 0.99)
	Si (Riesgo operativo alto)	Gama	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
E7 - Falla en equipos de instrumentación y seguridad de líneas (válvulas de seccionamiento, retención, trampa de diablos, tanques de almacenamiento, equipos de trasiego y contra incendios). (S/N)	No (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.01, 0.98, 0.99)	(0, 0.01, 0.98, 0.99)
	Si (Riesgo operativo alto)	Gama	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
E8 & E9 - Fuga en una posición de la tubería. (Robo de Hidrocarburo o fatiga del material). (S/N)	No (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.01, 0.98, 0.99)	(0, 0.01, 0.98, 0.99)
	Si (Riesgo operativo alto)	Gama	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
E10- Falla en rectificador de voltaje, variabilidad de potenciales y puentes eléctricos. (%)	Baja (Riesgo corrosivo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 14.99, 15.00)	(0, 0.001, 0.1499, 0.1500)
	Considerable	Trapezoidal	(14.99, 15.01, 74.99, 75.00)	(0.1499, 0.1501, 0.7499, 0.7500)
	Alta (Riesgo corrosivo alto)	Gama	(74.99, 75.01, 99.99, 100.00)	(0.7499, 0.7501, 0.9999, 1.00)
E11 - Falla en cama anódica, ánodos, cátodos, conexiones y conductores (%).	Baja (Riesgo corrosivo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 19.99, 20.00)	(0, 0.001, 0.1999, 0.2000)
	Considerable	Trapezoidal	(19.99, 20.01, 64.99, 65.00)	(0.1999, 0.2001, 0.6499, 0.6500)
	Alta (Riesgo corrosivo alto)	Gama	(64.99, 65.01, 99.99, 100.00)	(0.6499, 0.6501, 0.9999, 1.00)
E12- Falla en recubrimiento mecánico de la tubería (S/N)	No (Riesgo corrosivo bajo)	1-Gama	(0, 0.01, 0.98, 0.99)	(0, 0.01, 0.98, 0.99)
	Si (Riesgo corrosivo alto)	Gama	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)	(1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
E13 - Falla por agresividad corrosiva del suelo (grado del pH) (%)	Baja (Riesgo corrosivo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 9.99, 10.00)	(0, 0.001, 0.999, 0.1000)
	Considerable	Trapezoidal	(9.99, 10.01, 69.99, 70.00)	(0.999, 0.1001, 0.6999, 0.7000)
	Alta (Riesgo corrosivo alto)	Gama	(69.99, 70.01, 99.99, 100.00)	(0.6999, 0.7001, 0.9999, 1.00)
E14 - Falla por resistividad corrosiva del suelo (resistencia al flujo de una carga eléctrica) (%)	Baja (Riesgo corrosivo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 24.99, 25.00)	(0, 0.001, 0.2499, 0.2500)
	Considerable	Trapezoidal	(24.99, 25.01, 79.99, 80.00)	(0.2499, 0.2501, 0.7999, 0.8000)
	Alta (Riesgo corrosivo alto)	Gama	(79.99, 80.01, 99.99, 100.00)	(0.7999, 0.8001, 0.9999, 1.00)
E15- Falla por EPI (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 24.99, 25.00)	(0, 0.001, 0.2499, 0.2500)
	Considerable	Trapezoidal	(24.99, 25.01, 74.99, 75.00)	(0.2499, 0.2501, 0.7499, 0.7500)
	Crítica (Riesgo operativo alto)	Gama	(74.99, 75.01, 99.99, 100.00)	(0.7499, 0.7501, 0.9999, 1.00)
E16- Falla por PPM del EPI (%).	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 19.99, 20.00)	(0, 0.001, 0.1999, 0.2000)
	Considerable	Trapezoidal	(19.99, 20.01, 64.99, 65.00)	(0.1999, 0.2001, 0.6499, 0.6500)
	Crítica (Riesgo operativo alto)	Gama	(64.99, 65.01, 99.99, 100.00)	(0.6499, 0.6501, 0.9999, 1.00)
E17- Falla por LIP (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 29.99, 30.00)	(0, 0.001, 0.2999, 0.3000)
	Considerable	Trapezoidal	(29.99, 30.01, 64.99, 65.00)	(0.2999, 0.3001, 0.6499, 0.6500)
	Crítica (Riesgo operativo alto)	Gama	(64.99, 65.01, 99.99, 100.00)	(0.6499, 0.6501, 0.9999, 1.00)

Tabla 23 C

Etiquetas lingüísticas de las variables inciertas de los Sub sistemas

Variables inciertas (Outputs)	Etiqueta lingüística	Función de membresía	Intervalos	Normalización
E18 - Falla por ANPI (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 39.99, 40.00)	(0, 0.001, 0.3999, 0.4000)
	Considerable	Trapezoidal	(39.99, 40.01, 79.99, 80.00)	(0.3999, 0.4001, 0.7999, 0.8000)
	Critica (Riesgo operativo alto)	Gama	(79.99, 80.01, 99.99, 100.00)	(0.7999, 0.8001, 0.9999, 1.00)
E19 - Falla por PARED (Corrosión Interna o Externa) (%)	Bajo concentrado corrosivo (Riesgo operativo mínimo)	1-Gama	(0, 0.1, 29.99, 30.00)	(0, 0.001, 0.2999, 0.3000)
	Concentrado corrosivo notable	Trapezoidal	(29.99, 30.01, 69.99, 70.00)	(0.2999, 0.3001, 0.6999, 0.7000)
	Concentrado corrosivo abundante (Riesgo operativo alto)	Gama	(69.99, 70.01, 99.99, 100.00)	(0.6999, 0.7001, 0.9999, 1.00)
E20 - Falla por FER (%)	FER-Bajo (Riesgo operativo mínimo)	1-Gama	(0, 0.1, 24.99, 25.00)	(0, 0.001, 0.2499, 0.2500)
	FER-Considerable	Trapezoidal	(24.99, 25.01, 59.99, 60.00)	(0.2499, 0.2501, 0.5999, 0.6000)
	FER-Alto (Riesgo operativo crítico)	Gama	(59.99, 60.01, 99.99, 100.00)	(0.5999, 0.6001, 0.9999, 1.00)
E21 - Falla por deterioro mecánico en una sección de la tubería (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 29.99, 30.00)	(0, 0.001, 0.2999, 0.3000)
	Considerable	Trapezoidal	(29.99, 30.01, 59.99, 60.00)	(0.2999, 0.3001, 0.5999, 0.6000)
	Critica (Riesgo operativo alto)	Gama	(59.99, 60.01, 99.99, 100.00)	(0.5999, 0.6001, 0.9999, 1.00)
E22- Falla por exceder el SMYS (Límite elástico especificado del material de la tubería) (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 24.99, 25.00)	(0, 0.001, 0.2499, 0.2500)
	Considerable	Trapezoidal	(24.99, 25.01, 74.99, 75.00)	(0.2499, 0.2501, 0.7499, 0.7500)
	Critica (Riesgo operativo alto)	Gama	(74.99, 75.01, 99.99, 100.00)	(0.7499, 0.7501, 0.9999, 1.00)
E23- Falla por exceder la presión interna establecida por el FD (Factor de diseño de la tubería) (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 19.99, 20.00)	(0, 0.001, 0.1999, 0.2000)
	Considerable	Trapezoidal	(19.99, 20.01, 64.99, 65.00)	(0.1999, 0.2001, 0.6499, 0.6500)
	Critica (Riesgo operativo alto)	Gama	(64.99, 65.01, 99.99, 100.00)	(0.6499, 0.6501, 0.9999, 1.00)
E24- Falla por alteración en el tamaño de grano de la tubería (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 29.99, 30.00)	(0, 0.001, 0.2999, 0.3000)
	Considerable	Trapezoidal	(29.99, 30.01, 64.99, 65.00)	(0.2999, 0.3001, 0.6499, 0.6500)
	Critica (Riesgo operativo alto)	Gama	(64.99, 65.01, 99.99, 100.00)	(0.6499, 0.6501, 0.9999, 1.00)
E25 - Falla por alteración en la composición química del material de la tubería (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 39.99, 40.00)	(0, 0.001, 0.3999, 0.4000)
	Considerable	Trapezoidal	(39.99, 40.01, 79.99, 80.00)	(0.3999, 0.4001, 0.7999, 0.8000)
	Critica (Riesgo operativo alto)	Gama	(79.99, 80.01, 99.99, 100.00)	(0.7999, 0.8001, 0.9999, 1.00)
E26 - Falla por alteraciones a las propiedades físicas y elásticas del material de la tubería (s/mm)	Tiempo de elongación bajo (Riesgo operativo alto)	1-Gama	(0, 0.1, 59.99, 60.00)	(0, 0.001, 0.5999, 0.6000)
	Tiempo de elongación considerable	Trapezoidal	(59.99, 60.01, 95.99, 96.00)	(0.5999, 0.6001, 0.9599, 0.9600)
	Tiempo de elongación deseable (Riesgo operativo mínimo)	Gama	(95.99, 96.01, 139.99, 140.00)	(0.9599, 0.9601, 0.13999, 0.14000)
E27 & 28 - Falla por alteración micro geométrico del material en la tubería. (Agrietamiento y Cavidades). (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo)	1-Gama	(0, 0.1, 24.99, 25.00)	(0, 0.001, 0.2499, 0.2500)
	Considerable	Trapezoidal	(24.99, 25.01, 59.99, 60.00)	(0.2499, 0.2501, 0.5999, 0.6000)
	Critica (Riesgo operativo alto)	Gama	(59.99, 60.01, 99.99, 100.00)	(0.5999, 0.6001, 0.9999, 1.00)

4.5.4.2 Controlador Neuro-Difuso (ANFIS) del SMT a PCGC.

Para generar una interconexión estable entre los sub sistemas y el Algoritmo genético del SMT a PCGC, se procedió a desarrollar un controlador neuro-difuso, con la finalidad de enlazar los comportamientos de las fallas con el sistema principal y determinar las condiciones operativas confiables de succión y descarga de producto de la estación de bombeo de hidrocarburo (5A) ante escenarios de falla, situada en el centro de distribución Mendoza (CDM), considerada una estación de potencia debido al perfil topográfico complejo de la zona para el desarrollo de servicios logísticos, con altos indicadores de vandalismo y un deterioro mecánico considerable del sistema de transporte por oleoducto por efectos corrosivos del suelo.

Las capacidades de adaptación dinámicas que ofrecen los controladores inteligentes, facilitaran el proceso operativo de decisiones del STO ante condiciones de riesgo, el ANFIS procesa la información de salida que generan los 4 sub sistemas que conforman el SMT a PCGC mediante sus 24 escenarios de falla, 11 considerados firmas de falla únicas por su estructura residual a cargo de un algoritmo genético capaz de minimizar su impacto operativo en el sistema. La interconexión del controlador ANFIS con las salidas de los sub sistemas en Simulink se presenta a continuación en la figura 48.

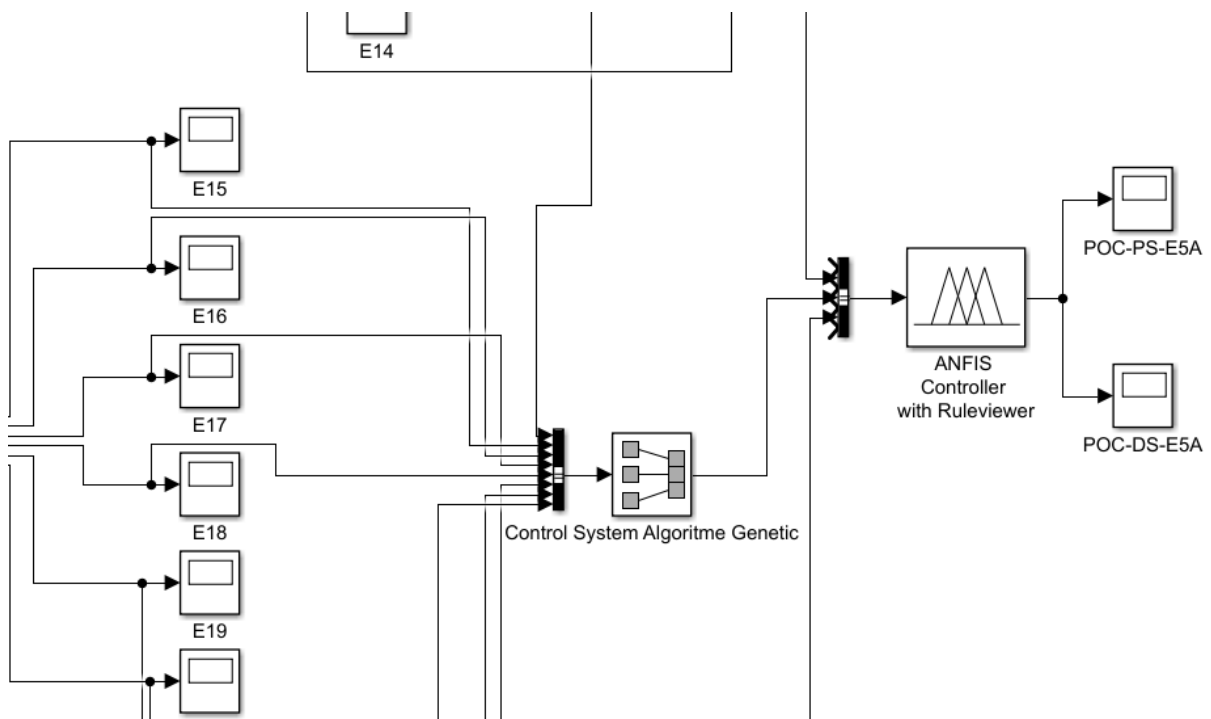


Figura 48. Interconexión del controlador ANFIS y los Sub sistemas.

El controlador ANFIS, recibe y modela la señal de los escenarios de falla para determinar las salidas del SMT a PCGC mediante los parámetros operativos confiables de succión y descarga de producto (POC-PS-E5A & POC-PD-E5A) lo que determinara condiciones de trabajo tolerables y recuperables ante condiciones de falla. La arquitectura del ANFIS parte de un modelo difuso Sugeno, con 24 variables de entrada y 2 de salida, como se muestra en la figura 49.

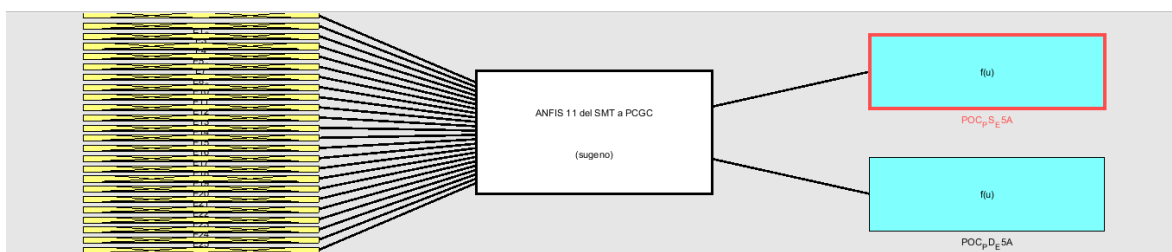


Figura 49. Modelo Difuso Sugeno.

La determinación de un modelo matemático confiable que exprese la dinámica del sistema de manera apropiada ante parámetros de falla, sería imposible debido a la variabilidad de fallas y su adverso impacto operativo al sistema, por lo cual se determinó establecer una asignación de específica de pesos por escenario de falla para establecer un sistema de reglas de inferencia difusas confiable que interprete de manera adecuada el comportamiento del sistema. Se determinaron 2400 Reglas con pesos de 1 para todos los escenarios falla excepto para los 11 escenarios de falla crítica atendidos por el algoritmo genético (E1&2, E5&6, E7, E8&9, E15, E16, E17, E18, E19, E20 y E21) los cuales por presentar una matriz de falla única obtienen un peso de 2. Las tablas, de la 24-A a la 24-G presentan las variables de entrada y salida del modelo difuso Sugeno, etiquetas lingüísticas, funciones de membresía e intervalos de confianza subrayando en color verde las fallas críticas.

Tabla 24-A

Etiquetas lingüísticas de las variables del ANFIS.

Variables de salida (Outputs)	(Etiqueta lingüística, Función de membresía & Intervalos Normalizados)
Parámetros operativos confiables de succión de producto – E5A (Kg/cm ²) POC-PS-E5A	Fuera de operación - 1-Gama - (0, 0.001, 0.3999, 0.4000) Baja – Gaussiana - (0.3999, 0.4001, 0.1849, 0.1850) Promedio – Gaussiana - (0.1849, 0.3750, 0.5550) Alta – Gama - (0.5549, 0.5551, 0.7550, 0.8550)
Parámetros operativos confiables de descarga del producto – E5A (Kg/cm ²) POC-PD-E5A	Fuera de operación - 1-Gama - (0, 0.001, 0.3999, 0.4000) Baja – Gaussiana - (0.3999, 0.4001, 0.1999, 0.2000) Promedio – Gaussiana - (0.1999, 0.4500, 0.6000) Alta – Gama - (0.5999, 0.6001, 0.8050, 0.9050)

Tabla 24-B

Etiquetas lingüísticas de las variables del ANFIS.

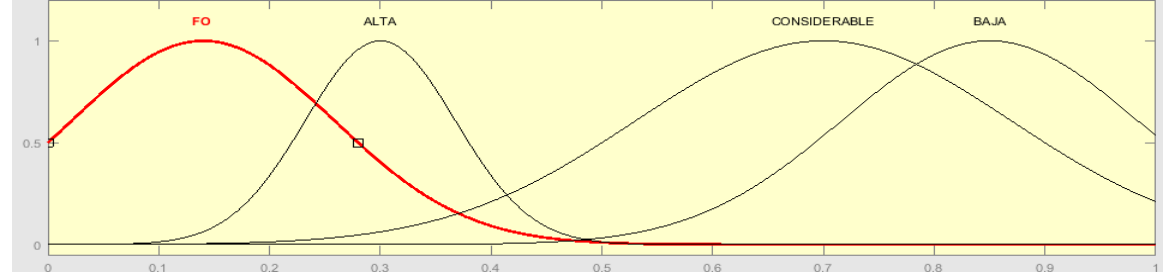
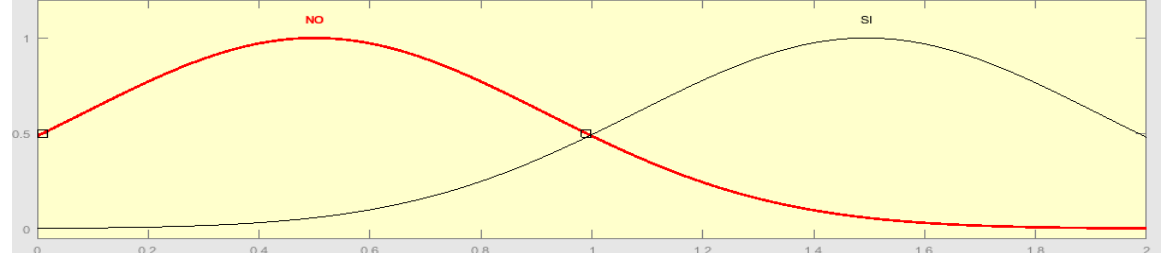
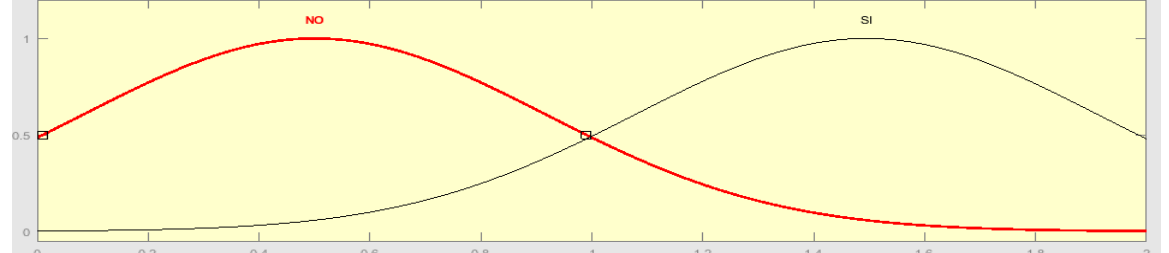
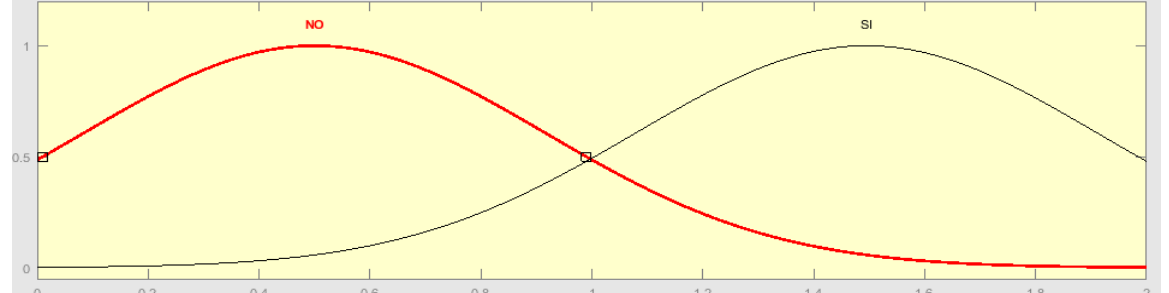
Variables de entrada (Inputs)	(Etiqueta lingüística, Función de membresía & Intervalos Normalizados)
E1 & E2- Falla en equipo dinámico de la estación de bombeo aguas arriba u abajo (Envío o Recibo de Producto – Descarga u Succión) (Kg/cm ²)	Fuera de operación - 1-Gama - (0, 0.001, 0.1399, 0.1400) Alta - Gaussiana - (0.1399, 0.1401, 0.2999, 0.3000) Considerable - Gaussiana - (0.2999, 0.3001, 0.6999, 0.7000) Baja - Gama - (0.6999, 0.7001, 0.8499, 0.8500)
	
E3- Falla por comunicación operativa de la estación aguas arriba o abajo (Envío y recibo de producto). (S/N)	No (Intermitente o nula) - 1-Gama - (0, 0.01, 0.98, 0.99) Si (Fuera de operación) – Gama - (1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
	
E4 - Falla por exceder la MAOP (Máxima presión segura para una tubería con un indicador de pérdida de metal). (S/N)	No (Riesgo operativo bajo) - 1-Gama - (0, 0.01, 0.98, 0.99) Si (Riesgo operativo alto) - Gama - (1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
	
ES & E6 - Falla en determinado sensor u actuador de flujo aguas arriba o abajo (Envío o Recibo de Producto) (S/N)	No (Riesgo operativo bajo) - 1-Gama - (0, 0.01, 0.98, 0.99) Si (Riesgo operativo alto) - Gama - (1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
	

Tabla 24-C

Etiquetas lingüísticas de las variables del ANFIS.

Variables de entrada (Inputs)	(Etiqueta lingüística, Función de membresía & Intervalos Normalizados)
E7 - Falla en equipos de instrumentación y seguridad de líneas (válvulas de seccionamiento, retención, trampa de diablos, tanques de almacenamiento, equipos de trasiego y contra incendios). (S/N)	No (Riesgo operativo bajo) - 1-Gama - (0, 0.01, 0.98, 0.99) Si (Riesgo operativo alto) - Gama,- (1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
E8 & E9 - Fuga en una posición de la tubería. (Robo de Hidrocarburo o fatiga del material). (S/N)	No (Riesgo operativo bajo) - 1-Gama - (0, 0.01, 0.98, 0.99) Si (Riesgo operativo alto) - Gama,- (1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
E10 - Falla en rectificador de voltaje, variabilidad de potenciales y puentes eléctricos. (%)	Baja (Riesgo corrosivo bajo) - 1-Gama - (0, 0.001, 0.1499, 0.1500) Considerable – Trapezoidal - (0.1499, 0.1501, 0.7499, 0.7500) Alta (Riesgo corrosivo alto) - Gama - (0.7499, 0.7501, 0.9999, 1.00)
E11 - Falla en cama anódica, ánodos, cátodos, conexiones y conductores (%).	Baja (Riesgo corrosivo bajo) - 1-Gama - (0, 0.001, 0.1999, 0.2000) Considerable – Gaussiana - (0.1999, 0.2001, 0.6499, 0.6500) Alta (Riesgo corrosivo alto) - Gama - (0.6499, 0.6501, 0.9999, 1.00)

Tabla 24-D

Etiquetas lingüísticas de las variables del ANFIS.

Variables de entrada (Inputs)	(Etiqueta lingüística, Función de membresía & Intervalos Normalizados)
E12 - Falla en recubrimiento mecánico de la tubería (S/N)	No (Riesgo operativo bajo) - 1-Gama - (0, 0.01, 0.98, 0.99) Si (Riesgo operativo alto) - Gama,- (1.00, 1.01, 1.98, 1.99)
E13 - Falla por agresividad corrosiva del suelo (grado del pH) (%)	Baja (Riesgo corrosivo bajo) - 1-Gama - (0, 0.001, 0.0999, 0.1000) Considerable – Gaussiana - (0.0999, 0.1001, 0.6999, 0.7000) Alta (Riesgo corrosivo alto) - Gama - (0.6999, 0.7001, 0.9999, 1.00)
E14 - Falla por resistividad corrosiva del suelo (resistencia al flujo de una carga eléctrica) (%)	Baja (Riesgo corrosivo bajo) - 1-Gama - (0, 0.001, 0.2499, 0.2500) Considerable - Gaussiana - (0.2499, 0.2501, 0.7999, 0.8000) Alta (Riesgo corrosivo alto) - Gama - (0.7999, 0.8001, 0.9999, 1.00)
E15 - Falla por EPI (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo) - 1-Gama - (0, 0.001, 0.2499, 0.2500) Considerable – Gaussiana - (0.2499, 0.2501, 0.7499, 0.7500) Crítica (Riesgo operativo alto) - Gama – (0.7499, 0.7501, 0.9999, 1.00)

Tabla 24-E

Etiquetas lingüísticas de las variables del ANFIS.

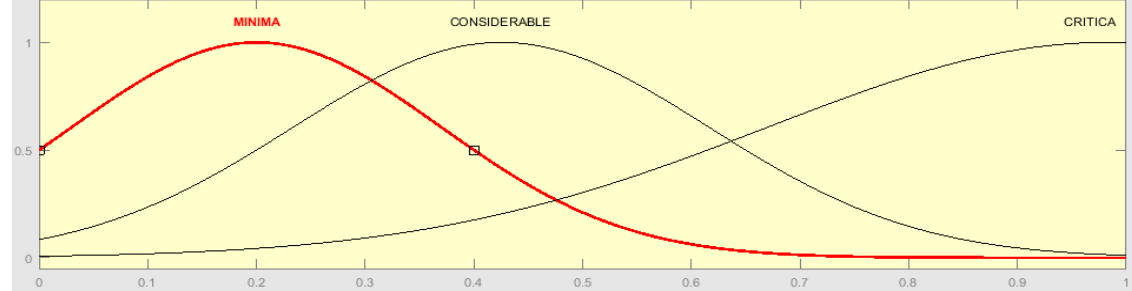
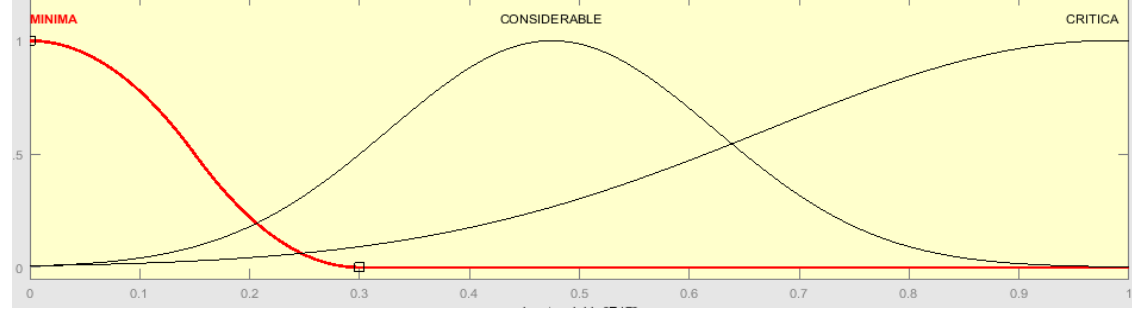
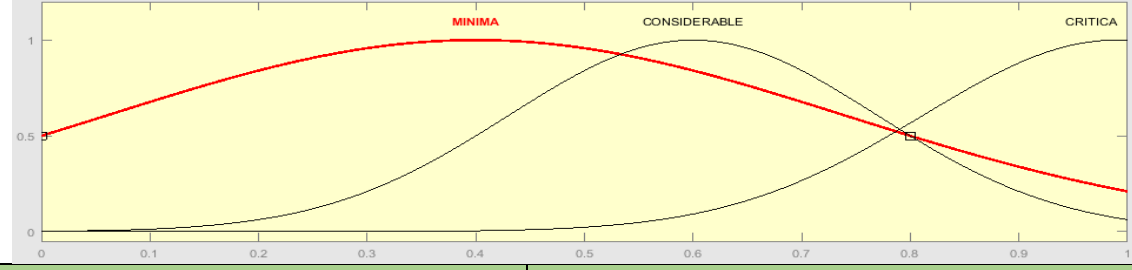
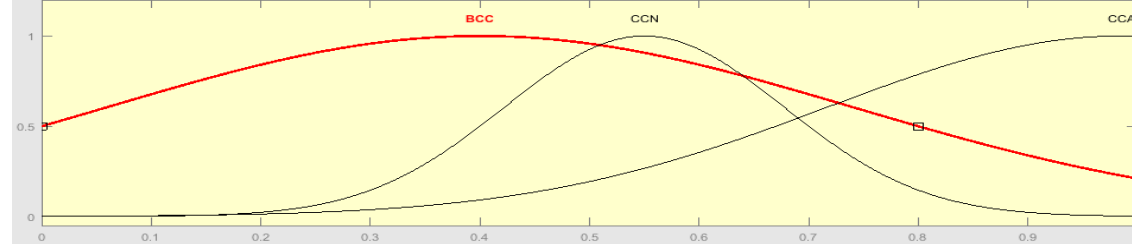
Variables de entrada (Inputs)	(Etiqueta lingüística, Función de membresía & Intervalos Normalizados)
E16- Falla por PPM del EPI (%).	Mínima (Riesgo operativo bajo) - 1-Gama - (0, 0.001, 0.1999, 0.2000) Considerable – Gaussiana - (0.1999, 0.2001, 0.6499, 0.6500) Crítica (Riesgo operativo alto) – Gama - (0.6499, 0.6501, 0.9999, 1.00)
	
E17- Falla por LIP (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo) - 1-Gama - (0, 0.001, 0.2999, 0.3000) Considerable – Gaussiana - (0.2999, 0.3001, 0.6499, 0.6500) Crítica (Riesgo operativo alto) - Gama - (0.6499, 0.6501, 0.9999, 1.00)
	
E18 - Falla por ANPI (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo) - 1-Gama - (0, 0.001, 0.3999, 0.4000) Considerable - Gaussiana - (0.3999, 0.4001, 0.7999, 0.8000) Crítica (Riesgo operativo alto) - Gama - (0.7999, 0.8001, 0.9999, 1.00)
	
E19 - Falla por PARED (Corrosión Interna o Externa) (%)	Bajo concentrado corrosivo (Riesgo operativo mínimo) - 1-Gama (0, 0.001, 0.2999, 0.3000) Concentrado corrosivo notable - Gaussiana (0.2999, 0.3001, 0.6999, 0.7000) Concentrado corrosivo abundante (Riesgo operativo alto) - Gama (0.6999, 0.7001, 0.9999, 1.00)
	

Tabla 24-F

Etiquetas lingüísticas de las variables del ANFIS.

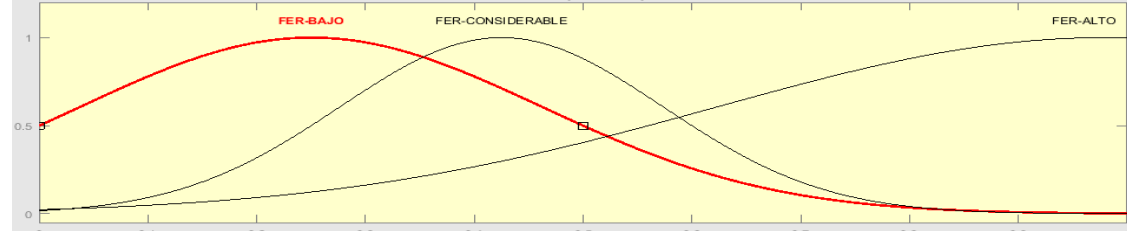
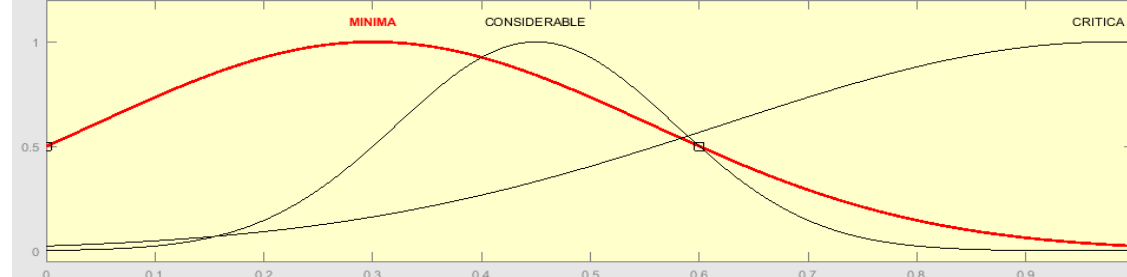
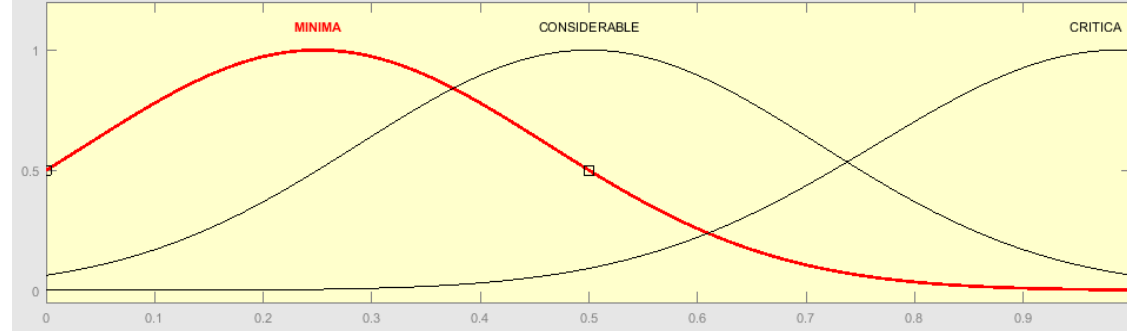
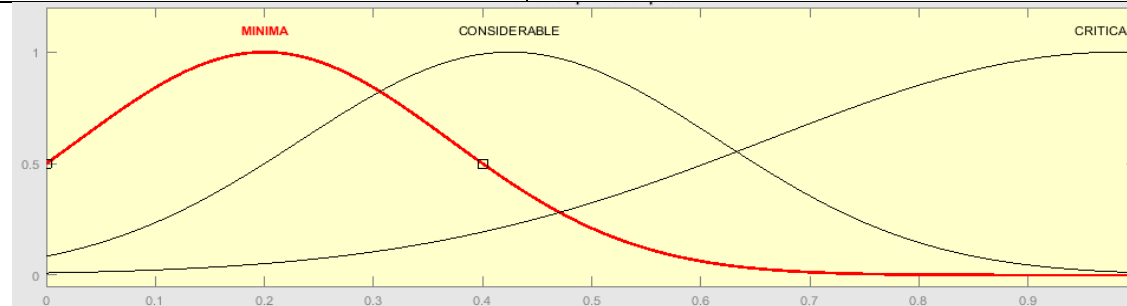
Variables de entrada (Inputs)	(Etiqueta lingüística, Función de membresía & Intervalos Normalizados)
E20 - Falla por FER (%)	FER-Bajo (Riesgo operativo mínimo) - 1-Gama (0, 0.001, 0.2499, 0.2500) FER-Considerable – Gaussiana - (0.2499, 0.2501, 0.5999, 0.6000) FER-Alto (Riesgo operativo crítico) - Gama (0.5999, 0.6001, 0.9999, 1.00)
	
E21 - Falla por deterioro mecánico en una sección de la tubería (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo) - 1-Gama - (0, 0.001, 0.2999, 0.3000) Considerable – Gaussiana - (0.2999, 0.3001, 0.5999, 0.6000) Crítica (Riesgo operativo alto) - Gama - (0.5999, 0.6001, 0.9999, 1.00)
	
E22 - Falla por exceder el SMYS (Límite elástico especificado del material de la tubería) (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo) 1-Gama - (0, 0.001, 0.2499, 0.2500) Considerable – Gaussiana - (0.2499, 0.2501, 0.7499, 0.7500) Crítica (Riesgo operativo alto) - Gama - (0.7499, 0.7501, 0.9999, 1.00) Mínima (Riesgo operativo bajo) 1-Gama - (0, 0.001, 0.1999, 0.2000)
	
E23 - Falla por exceder la presión interna establecida por el FD (Factor de diseño de la tubería) (%).	Mínima (Riesgo operativo bajo) 1-Gama (0, 0.001, 0.1999, 0.2000) Considerable – Gaussiana - (0.1999, 0.2001, 0.6499, 0.6500) Crítica (Riesgo operativo alto) - Gama (0.6499, 0.6501, 0.9999, 1.00)
	

Tabla 24-G

Etiquetas lingüísticas de las variables del ANFIS.

Variables de entrada (Inputs)	(Etiqueta lingüística, Función de membresía & Intervalos Normalizados)
E24- Falla por alteración en el tamaño de grano de la tubería (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo) 1-Gama (0, 0.001, 0.2999, 0.3000) Considerable – Gaussiana (0.2999, 0.3001, 0.6499, 0.6500) Crítica (Riesgo operativo alto) - Gama (0.6499, 0.6501, 0.9999, 1.00)
E25 - Falla por alteración en la composición química del material de la tubería (%)	Mínima (Riesgo operativo bajo) 1-Gama (0, 0.001, 0.3999, 0.4000) Considerable – Gaussiana - (0.3999, 0.4001, 0.7999, 0.8000) Crítica (Riesgo operativo alto) - Gama - (0.7999, 0.8001, 0.9999, 1.00)
E26 - Falla por alteraciones a las propiedades físicas y elásticas del material de la tubería (s/mm)	Tiempo de elongación bajo (Riesgo operativo alto) 1-Gama (0, 0.001, 0.5999, 0.6000) Tiempo de elongación considerable – Gaussiana (0.5999, 0.6001, 0.9599, 0.9600) Tiempo de elongación deseable (Riesgo operativo mínimo) - Gama (0.9599, 0.9601, 0.13999, 0.14000)
E27 & 28 - Falla por alteración micro geométrica del material en la tubería.	Mínima (Riesgo operativo bajo) 1-Gama (0, 0.001, 0.2499, 0.2500) Considerable – Gaussiana - (0.2499, 0.2501, 0.5999, 0.6000) Crítica (Riesgo operativo alto) Gama (0.5999, 0.6001, 0.9999, 1.00)

Los diagramas de superficie de respuesta representan, el comportamiento grafico del controlador ANFIS ante las reglas de inferencia difusas, la ilustración 50 presenta cuatro comportamientos de las variables de entrada consideradas fallas críticas ante la salida del controlador (*POC-PS-E5A*), como se describe a continuación:

[A] Se representa la activación del escenario (E5 & E6), por Falla en determinado sensor u actuador de flujo aguas arriba o abajo (Envío o Recibo de Producto), el cual máxima su riesgo al aumentar el porcentaje de Falla por LIP (E17), donde la capacidad de presión de succión de la estación 5A (*POC-PS-E5A*), se reduce drásticamente por la inestabilidad del oleoducto con la posibilidad de llegar a indicadores que generen que el sistema salga de operación.

[B] Se representa la activación del escenario (E1 & E2), por Falla en equipo dinámico de la estación de bombeo aguas arriba u abajo (Envío o Recibo de Producto – Descarga u Succión) ante Falla por PARED (Corrosión Interna o Externa) (E19), la cual al aumentar el porcentaje de corrosión en el oleoducto reduce notablemente la capacidad de succión de la estación (*POC-PS-E5A*), que enlazada a una falla en equipos dinámicos puede generar variabilidades del caudal negativas.

[C] Se representa la activación del escenario de falla (E7), Falla en equipos de instrumentación y seguridad de líneas (válvulas de seccionamiento, retención, trampa de diablos, tanques de almacenamiento, equipos de trasiego y contra incendios, ante (*POC-PS-E5A*), la cual bajo indicadores bajos mantiene indicadores promedio de presión de succión de producto sin embargo al intervenir un factor estimado de reparación FER mayor a uno (E20), las capacidades de succión bajan por el inminente riesgo de cavitación en el sistema.

[D] Se representa la activación del escenario (E1 & E2), por Falla en equipo dinámico de la estación de bombeo aguas arriba u abajo (Envío o Recibo de Producto – Descarga u Succión) que ante (E21) Falla por deterioro mecánico en una sección de la tubería, maximiza su riesgo operativo al aumentar sus indicadores impactando directamente la capacidad de succión de producto de la estación (*POC-PS-E5A*).

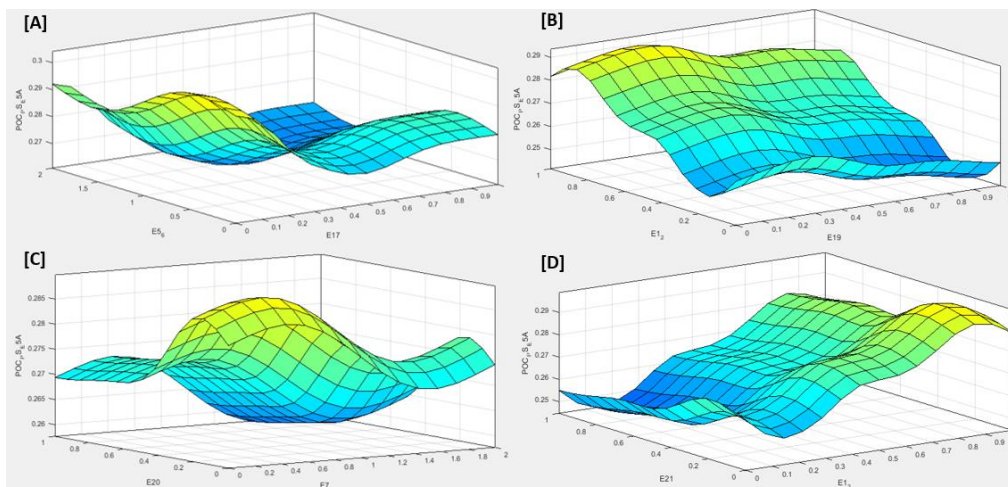


Figura 50. Diagramas de superficie del ANFIS.

La capacidad de respuesta de las salidas del controlador ANFIS ante el efecto de una falla de manera puntual se evaluó, para determinar una correlación confiable del sistema estimado con el real, la figura 51 muestra la relación de activación de los escenarios de falla (E1 & E2, E5 & E6, E16, E17) con la variable de salida parámetros operativos confiables de presión de descarga de producto de la estación (POC-PD-E5A), mostrando un comportamiento favorable a la dinámica que representa el STO.

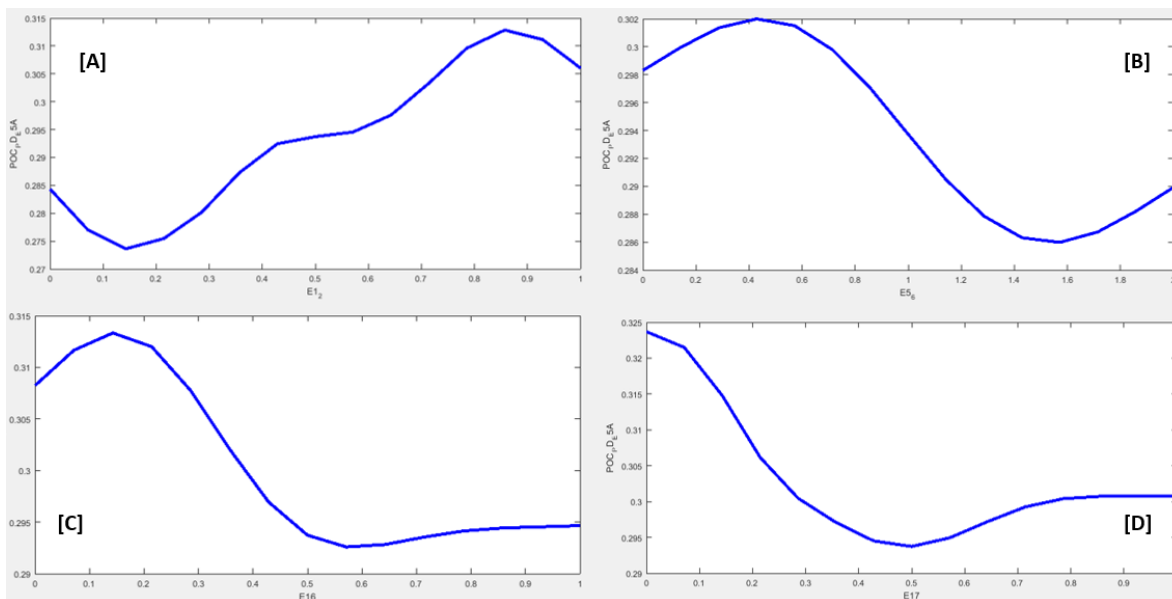


Figura 51. Comportamiento de las variables de falla del ANFIS.

Una vez desarrolladas las pruebas de comportamiento del modelo difuso Sugeno se procedió a estructurar la arquitectura de la red neuronal para generar el ANFIS, la cual consta de 24 neuronas de entrada y dos de salida, la cual se ilustra a continuación en la figura 52.

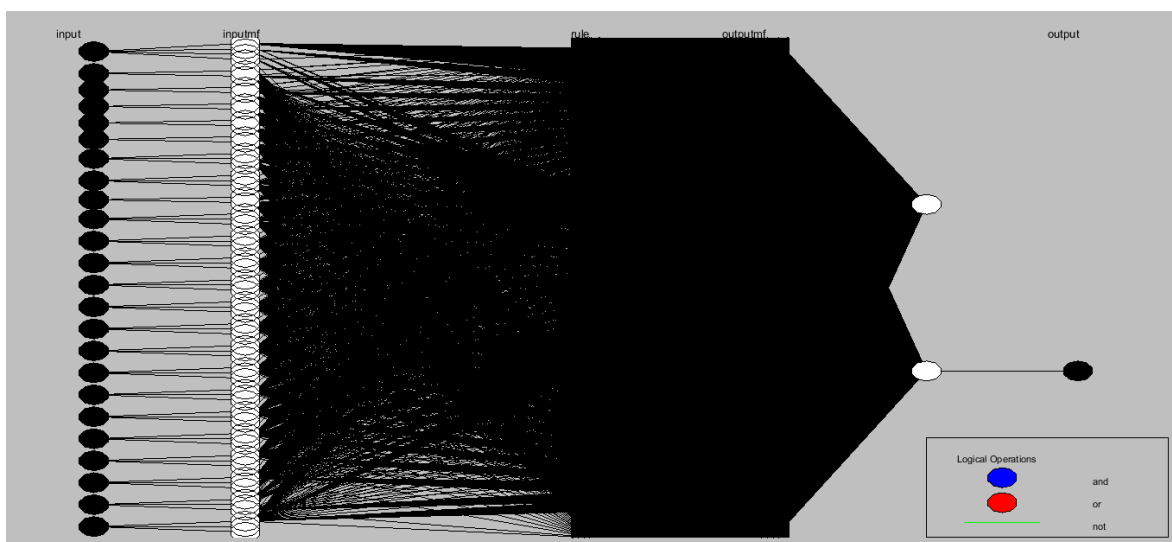


Figura 52. Arquitectura de la RNA del ANFIS.

La computación flexible engloba un conjunto de técnicas que tienen en común la robustez en el manejo de la información imprecisa e incierta que existe en los problemas relacionados con el mundo real (por ejemplo: reconocimiento de formas, clasificación, toma de decisiones, etc.) El ANFIS desarrollado estima valores operativos confiables para la E5A, mediante la correlación de información que generan los sub sistemas. La red neuronal multicapa del ANFIS emplea un conjunto de 2600 datos para su entrenamiento, validación y pruebas. El 70% de ellos se utilizaron como conjunto de datos de entrenamiento. Los datos restantes se utilizan como conjunto de datos de prueba y validación, mediante un sistema de aprendizaje híbrido retroalimentado. La imagen 53, muestra dos procedimientos de entrenamiento de la red [A & B] con un margen de tolerancia al error máximo del 5% empleando 100 épocas.

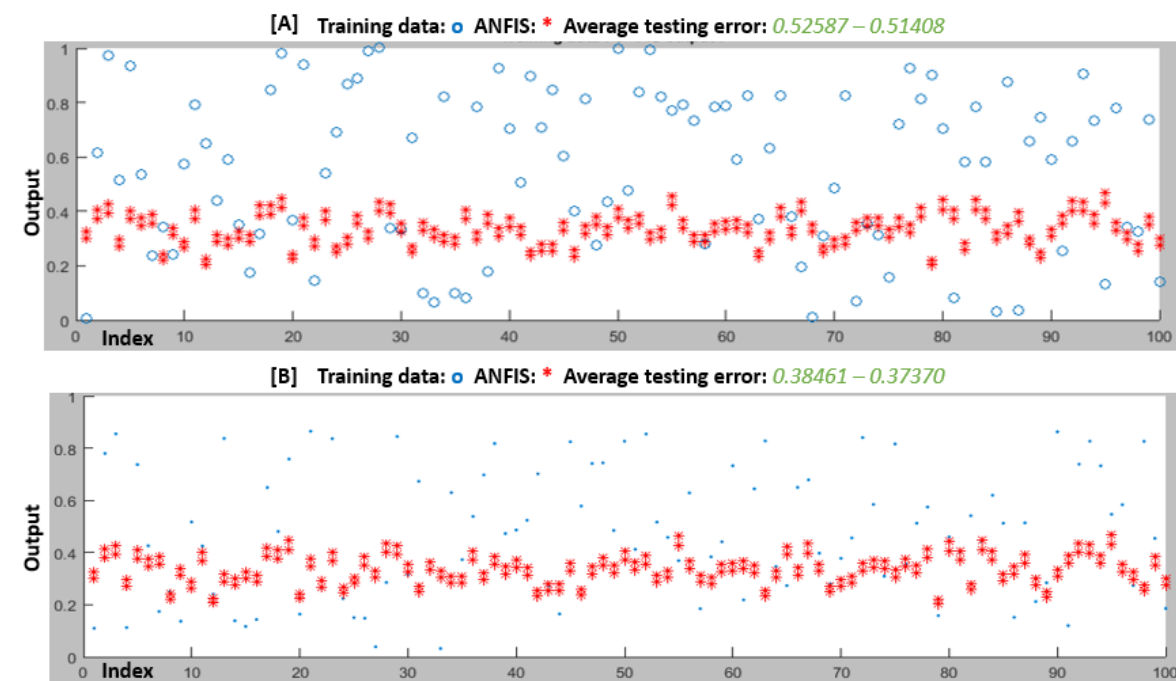


Figura 53. Entrenamiento del Sistema Neuro-difuso

La red multicapa no. 43 con un valor en pruebas del 0.9135, entrenamiento 0.8991 y validación del 0.9024, es empleada para evaluar la correlación de entre las variables de salida del proceso medidas & estimadas: $e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$. Analizando el comportamiento de las variables de salida (*POC PS* & *PD E5A*), mediante una muestra representativa de 120 datos de la población, la figura 54, muestra el comportamiento de las variables y la holgura existente entre el sistema real y virtual: $\sigma = y(t) - \hat{y}(t)$.

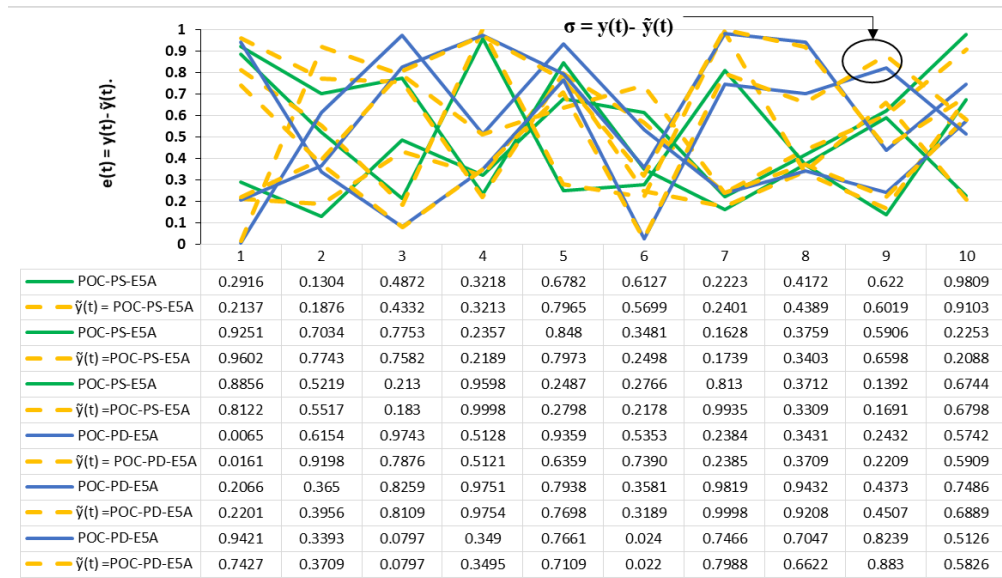


Figura 54. Comportamiento del sistema real & virtual.

Una vez desarrollado el procedimiento de pruebas, validación y resultados del ANFIS, se validó el comportamiento de las variables de falla ante las salidas. La figura 55 representa el asociamiento de las fallas en color amarillo y en color verde las fallas consideradas críticas sobre el eje X y las salidas del controlador en color azul mediante el eje Y. El comportamiento de las fallas permite observar que las capacidades de succión y descarga de producto de la estación (*POC PS & PD E5A*) pueden maximizarse fuera del alcance de alguna falla asociada o crítica al llegar a puntos operativos máximos, sin embargo, en la presencia de fallas las capacidades operativas que ofrece el ANFIS, se reducen considerablemente tomando parámetros conservadores y confiables para el sistema de transporte por oleoducto.

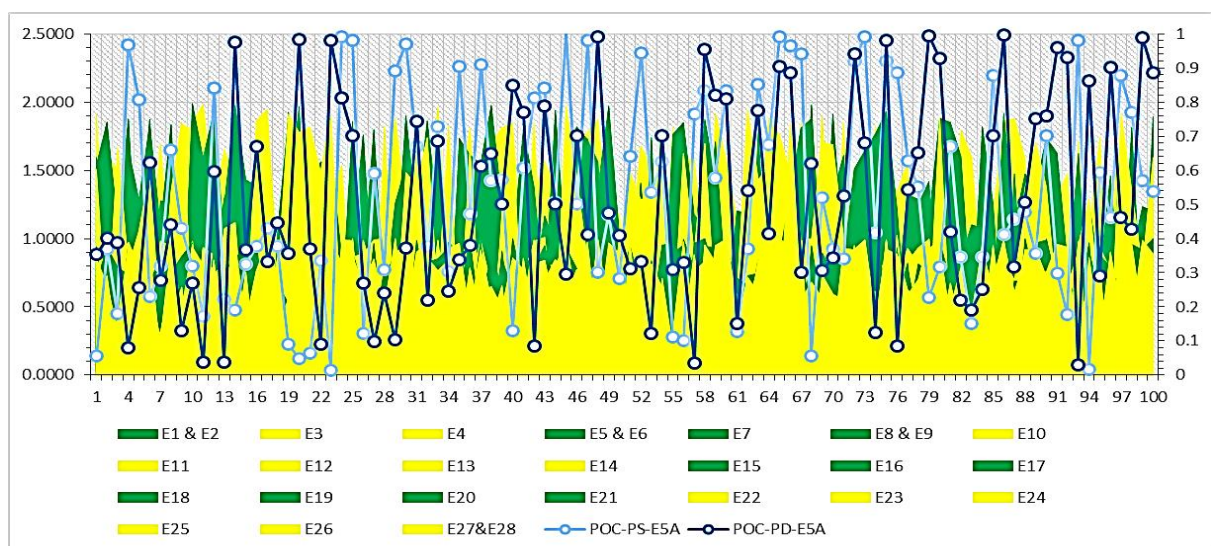


Figura 55. Asociación de Variables de Fallas Vs Salidas.

4.6 Etapa 5: Analizar los posibles casos de reconfiguración.

4.6.1 Aplicación de algoritmos genéticos para minimizar la gestión de fallas únicas, así como casos de reconfigurabilidad del SMT A PCGC.

El SMT a PCGC presenta en su matriz de fallas (Véase figura 56) firmas únicas con una estructuración de residuos única consideradas no redundantes, como lo son E1&2, E5&6, E7, E8&9 para el **Sub sistema 1** y E15, E16, E17, E18, E19, E20 y E21 para el **Sub sistema 3** las cuales son puntos de atención crítica para el STO.

	E1&2	E3	E4	E5&6	E7	E8&9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	E25	E26	E27&28	
r1	X	X	X	X	X	X																			
r2	X	X	X	X	X	X																			
r3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
r4	X	X	X	X	X	X						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
r5	X	X	X	X	X	X																			
r6	X	X	X	X	X	X																			
r7	X	X	X		X	X																			
r8						X																			
r9		X	X			X						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
r10		X	X			X	X	X	X	X	X														
r11		X	X			X	X	X	X	X	X														
r12		X	X			X	X	X	X	X	X														
r13						X	X	X	X	X	X														
r14						X	X	X	X	X	X														
r15		X	X			X	X	X	X	X	X	X							X	X	X	X	X	X	X
r16		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X						X	X	X	X	X	X	X
r17		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X
r18		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X
r19		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
r20		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
r21		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
r22		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
r23		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
r24		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
r25		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
r26		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
r27		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
r28		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Figura 56. Matriz de firma de fallas únicas para los Sub sistema 1 y 3.

Para minimizar la gestión de fallas únicas del SMT a PCGC, se analizaron diversas técnicas de optimización empleadas en la literatura en los últimos años, como la simulación de recocido (Simulated Annealing), la optimización de Enjambre por partículas (Particle Swarm Optimization) y los algoritmos genéticos (Genetic Algorithm), los antes mencionados ocupan los tres primeros lugares en el ranking de optimizadores según Scopus en su última actualización en 2019.

En la aplicación del caso en estudio se utilizaron AG de tipo combinatoriales, los cuales seleccionan dentro de un conjunto de firmas de fallas las que contienen características únicas, entre un conjunto de (n) fallas, cada una con un valor (c_i) y una incidencia de diversos escenarios de falla interna (v_i), considerando aquellas fallas que sean más recurrentes dentro del STO (V), y que tengan el mayor factor de incidencia posible a través de una ecuación que enlace los componentes sujetos a determinadas restricciones para optimizar resultados. La ecuación 1 representa la composición tradicional de un AG.

$$\text{Maximizar o Minimizar } \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (8)$$

$$\text{Sujeto a } \sum_{i=1}^n v_i x_i \leq v$$

$$x_i \in 0,1$$

Para determinar el mecanismo de codificación del AG a la problemática de incidencia de fallas con estructura única del SMT a PCGC, se generaron cromosomas que representan a los individuos que a la vez son las soluciones posibles que tiene el problema en lo particular, esta codificación va hacer representada por los linds, que representan a cada una de las fallas únicas dentro del STO. La metodología empleada considera generar una población aleatoria, que será evaluada mediante una función objetivo, que determina cual sería el menor impacto que pueden generar una combinación de fallas únicas dentro del STO, determinando si hay condiciones violadas para el resultado mediante restricciones, cuando se determine la solución esperada se toma el mejor resultado y de no ser así se toma esta población para interactuar con los demás operadores de selección como son los de combinación, cruce y mutación hasta encontrar el resultado esperado. La Figura 57 muestra la estructura del algoritmo para el SMT a PCGC.

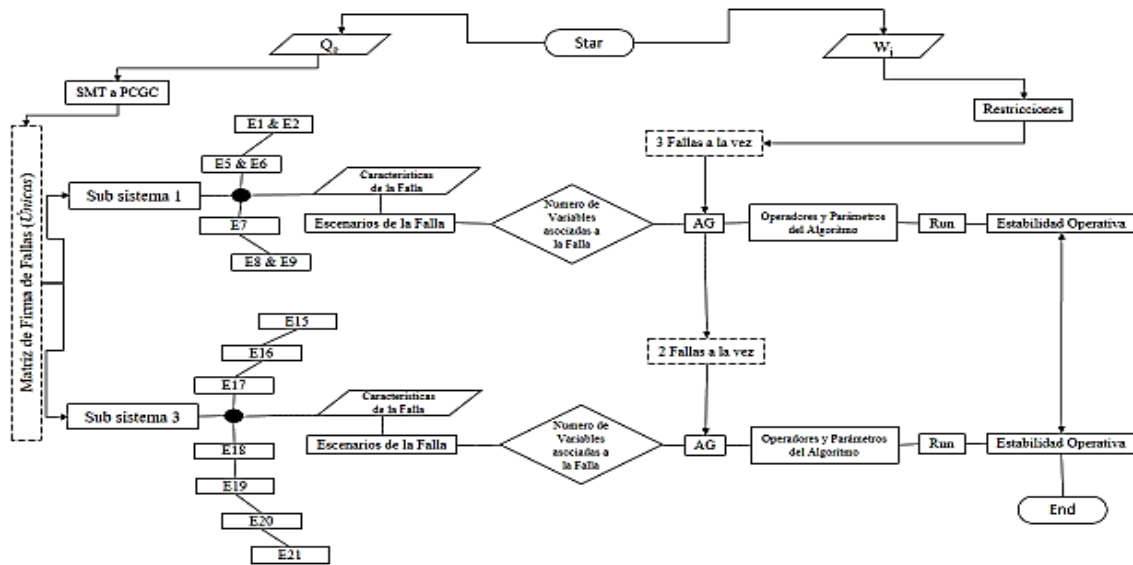


Figura 57. Algoritmo aplicado para la optimización de los sub sistemas 1 y 3.

El planteamiento del algoritmo genético para el sub sistema 1 y 3 se representa a continuación en la tabla 25 A y B. La ecuación (1 & 2) representan la postura para definir la función objetivo (3) para minimizar la aparición de fallas en el sistema. Las fallas únicas (X_i) mediante la ponderación del impacto de las variables relacionadas a la falla por su peso (U_i) determinan un criterio de decisión para reducir la diversificación de escenarios de falla (P_i), estableciendo una cuantificación del comportamiento de los escenarios de falla crítica a través de las variables asociadas dentro de la falla, limitando con las restricciones el número de fallas (Z), para que el algoritmo genético sea capaz de mantener el sistema operando ante condiciones inestables.

Tabla 25-A

Planteamiento del Algoritmo para el Sub sistema 1.

Planteamiento		
Minimizar	$X_i =$ Falla Única i	$U_i =$ Impacto de las variables relacionadas a la falla i
(1) $\sum_{i=1}^n U_i x_i$		
(2) $\sum_{i=1}^n P_i x_i$	$P_i =$ Diversificación de escenarios de la falla.	
Escenario de falla del Sub sistema 1.	Variables de entrada asociadas a la falla.	Escenarios dentro de la Falla
E1&2	6	4
E5&6	5	2
E7	8	2
E8&9	7	2
Función Objetivo	Función de restricción	$4x_1 + 2x_2 + 2x_3 + 2x_4 \leq 6$
(3) $Z = 6x_1 + 5x_2 + 8x_3 + 7x_4$	Limitando que no aparezcan más de tres fallas a la vez en el sistema.	

Tabla 25-B.

Planteamiento del Algoritmo para el Sub sistema 3.

Planteamiento		
Minimizar	$X_i = \text{Falla Única } i$	$U_i = \text{Impacto de las variables relacionadas a la falla } i$
(1) $\sum_{i=1}^n U_i x_i$		
(2) $\sum_{i=1}^n P_i x_i$	$P_i = \text{Diversificación de escenarios de la falla.}$	
Escenario de falla del Sub sistema 3.	VARIABLES de entrada asociadas a la falla.	Escenarios dentro de la Falla
E15	2	3
E16	2	3
E17	2	3
E18	2	3
E19	2	3
E20	7	3
E21	7	3
Función Objetivo	Función de restricción	
(3) $Z = 2x_1 + 2x_2 + 2x_3 + 2x_4 + 2x_5 + 7x_6 + 7x_7$	$3x_1 + 3x_2 + 3x_3 + 3x_4 + 3x_5 + 3x_6 + 3x_7 \leq 6$	
	Limitando que no aparezcan más de dos fallas a la vez en el sistema.	

El planteamiento considera 1 gen por cada variable de decisión binaria, las cuales conforman a su vez a los cromosomas que representan las fallas únicas mediante estructuras binarias de [0,1] que determinan un tamaño inicial para una población, determinando mediante una función de aptitud (función de restricciones), que representa el desempeño de una solución con respecto al objetivo que se desea optimizar (función objetivo), donde si el cromosoma no es factible es penalizado con el mecanismo de pena de muerte, estableciendo una probabilidad de cruce (Pcr) en 0.98 y la probabilidad de mutación (Pmut) 0,1. A continuación la tabla 26 A y B, respectivamente representan la estructura y evaluación de los cromosomas mediante sus genes para representar las fallas únicas de los sub sistemas 1 y 3.

Tabla 26-A

Evaluación de la población para el sub sistema 1.

Cromosoma para Sub sistema 1: $X_1 X_2 X_3 X_4$ Tamaño de población 4 $b_1 b_2 b_3 b_4$								
Función Objetivo $Z = 6x_1 + 5x_2 + 8x_3 + 7x_4$ Función de restricción $= 4x_1 + 2x_2 + 2x_3 + 2x_4 \leq 6$								
Ind	X1	X2	X3	X4	Z	peso	Probabilidad	P. Acom.
1	0	1	1	0	13	4	0.29730	0.29730
2	1	0	1	0	14	6	0.27027	0.56757
3	0	1	0	0	5	2	0.13514	0.70270
4	0	1	1	0	13	4	0.29730	1.00000
					45			

Tabla 26-B

Evaluación de la población para el sub sistema 3.

Cromosoma para Sub sistema 3: $X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7$ Tamaño de población 7												
$b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 b_6 b_7$												
Función Objetivo $Z = 2x_1 + 2x_2 + 2x_3 + 2x_4 + 2x_5 + 7x_6 + 7x_7$												
Función de restricción $= 3x_1 + 3x_2 + 3x_3 + 3x_4 + 3x_5 + 3x_6 + 3x_7 \leq 6$												
Ind	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Z	peso	Probabilidad	P. Acom.	
1	0	1	0	0	0	1	0	9	6	0.29850	0.29850	
2	1	0	0	0	0	1	0	9	6	0.27400	0.57250	
3	0	1	0	0	0	0	0	2	6	0.13731	0.70981	
4	0	1	1	0	0	0	0	4	6	0.29019	1.00000	
								24				

El Algoritmo genético está configurado mediante una función de restricción (≤ 6), aplicada a los escenarios de falla de los sistemas, con un mínimo de mutación de cruce de dos escenarios y un máximo de cinco entre la población, para limitar la cantidad de fallas a la vez en el sistema, gestionando que no aparezcan más de tres fallas a la vez en el sub sistema 1 y no más de dos en el sub sistema 3. Los valores, de los parámetros y operadores genéticos, del GA se establecen, a partir de la información de la literatura, donde, la población se define en 50 individuos, un 50.00-% y 10.00-%, corresponden a la tasa de mutación y a la tasa de cruce, respectivamente. El simulador Evolver, es seleccionado, por las ventajas que presenta, tales como, una representación precisa de los datos y un menor tiempo de procesamiento, lo cual, se refleja en un menor número de muestras, en comparación con Matlab de Simulink el cual no se descartó para dicho procedimiento y se representan más adelante sus resultados. (Palisade Corporation, 2009).

El software Evolver, permite desarrollar enlaces con tablas dinámicas de Excel lo que facilita el manejo estadístico de los datos, la tabla 26 representa la interfaz del modelo de optimización desarrollado para los escenarios de falla del sub sistema 1, mostrando el porcentaje del impacto asociado de las fallas al STO con respecto a sus variables, considerando el escenario de falla E7 el de mayor impacto con un 32.5%. La interconexión de las variables asociadas a la falla nos permite identificar mediante un código binario la incidencia de cruce entre los escenarios de falla en la tabla, así como su afinidad a través de un gráfico radial, generado por un impacto del 38% con variables asociadas al STO y 62% para las vinculadas a las estaciones de bombeo secuencial (E). La siguiente sección representa los escenarios dentro de la falla y la restricción aplicada al procedimiento de optimización para minimizar efectos de incidencias de las fallas, mediante un código de números naturales que simplifique al Algoritmo Genético la identificación del impacto asociado de los escenarios de falla.

Tabla 27.

Interface de Evolver para el sub sistema 1.

Modelo de optimización de Escenario de falla para el Sub sistema 1																
Escenarios de Falla		E1&2	E5&6	E7	E8&9											
Variables de entrada asociadas a la falla		6	5	8	7											
Impacto asociado de la falla al STO		22.5	17.5	32.5	27.5	Interconexiones de las variables con las Fallas.										
Variables de entrada Sub Sistema 1	CPS-E5	1	0	0	0											
	CPD-E5A	1	0	0	0											
	MH-E5	1	1	1	0											
	MH-E5A	1	1	1	0											
	MH-STO	0	1	1	1											
	RH-E	0	0	0	0											
	TB-E	1	0	0	0											
	ES-E	1	0	1	1											
	ECA-E	0	0	0	1											
	EMFI-E	0	1	0	0											
	VR-STO	0	0	1	1											
	VS-STO	0	0	1	1											
	TD-E	0	0	1	1											
	IMF-STO	0	0	0	0											
	ECM-STO	0	1	1	1											
Escenarios dentro de la falla		4	2	2	2	Restricción para los escenario de falla EF ≤ 6										
Impacto (%)	Impacto del escenario 1	0 – 25 (0)	0 – 50 (0)	0 – 50 (0)	0 – 50 (0)											
	Impacto del escenario 2	25.1 – 50 (1)	50.1 – 100 (1)	50.1 – 100 (1)	50.1 – 100 (1)											
	Impacto del escenario 3	50.1 – 75 (2)	(0)	(0)	(0)											
	Impacto del escenario 4	75.1 – 100 (3)	(0)	(0)	(0)											
Impacto asociado de máximo 2 fallas al STO		R - AG	R - AG	R - AG	R - AG	Minimizar la gestión del Impacto asociado mediante un Algoritmo Genético.										

El AG, tardo 01.57-s, en encontrar la solución sub-óptima. Proveyendo las salidas, cuatro esquemas de escenarios de fallas (1, 2, 4 & 17) que reúnen las características y restricciones establecidas (Met), minimizando impactos al sistema de transporte por oleoductos (ver tabla 28).

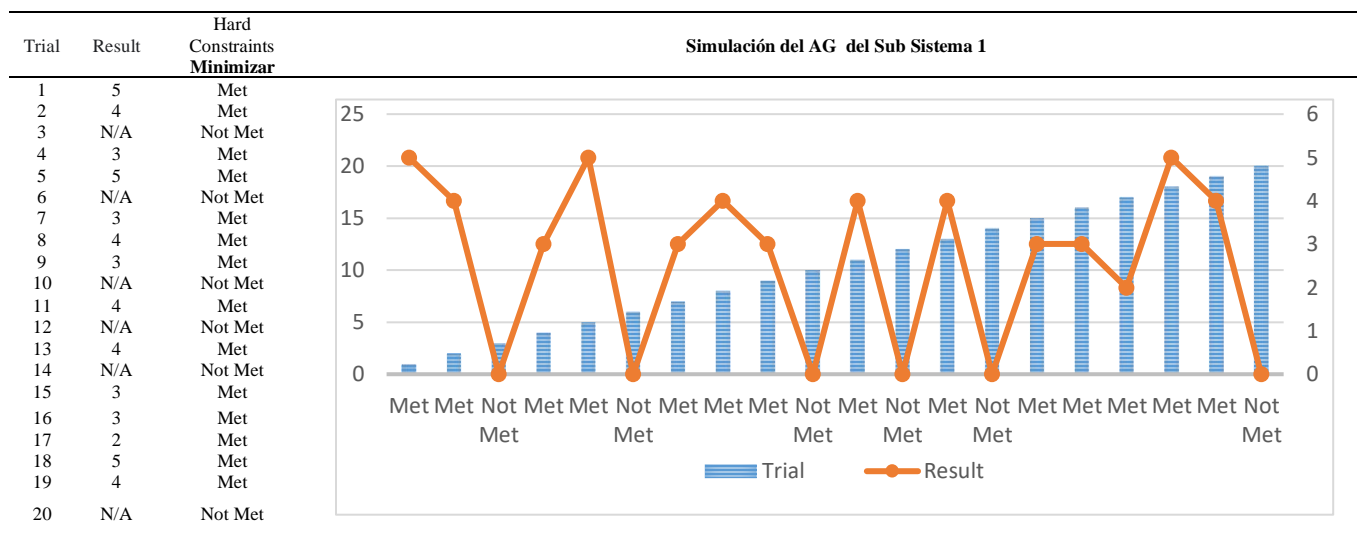
Tabla 28.

Resultados de Evolver para el sub sistema 1.

Trial	Elapsed Time	Result	Adjustable Cells														Hard Constraints		
			C30	D30	E30	F30	C31	D31	E31	F31	C32	D32	E32	F32	C33	D33	E33	F33	minimizar
1	1.15741E-05	5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	3	0	0	0	Met
2	2.31481E-05	4	0	0	1	0	1	1	1	1	1	3	0	0	3	0	0	0	Met
4	2.31481E-05	3	0	0	1	0	1	1	1	1	3	0	0	3	0	0	0	Met	
17	4.62963E-05	2	0	0	0	0	1	1	1	1	3	0	0	0	3	0	0	0	Met

El comportamiento de la solución, a través del proceso de optimización, por medio de la metaheurística del AG, se vislumbra en la tabla 29, representando el comportamiento de 20 muestras de valores máximos y mínimos, esperados dentro de una población de 2000 muestras en un tiempo de optimización indeterminado.

Tabla 29. Simulación de Evolver para el sub sistema 1.



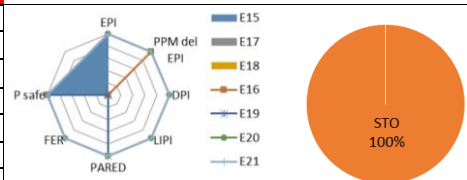
La tabla 30 representa la interfaz del modelo de optimización desarrollado para los escenarios de falla del sub sistema 3, mostrando el porcentaje del impacto asociado de las fallas al STO con respecto a sus variables, considerando los escenarios de falla E20 & E21 los de mayor impacto con un 33.6%.

La interconexión de las variables asociadas a la falla nos permite identificar mediante un código binario la incidencia de cruce entre los escenarios de falla en la tabla, así como su afinidad a través de un gráfico radial, generado por un impacto del 100% con variables asociadas al STO y nula para las vinculadas a las estaciones de bombeo secuencial (E). La siguiente sección representa los escenarios dentro de la falla y la restricción aplicada al procedimiento de optimización para minimizar efectos de incidencias de las fallas, mediante un código de números naturales que simplifique al Algoritmo genético la identificación del impacto asociado de los escenarios de falla.

Tabla 30.

Interface de Evolver para el sub sistema 3.

Modelo de optimización de Escenario de falla para el Sub sistema 3								
Escenarios de Falla		E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21
Variables de entrada asociadas a la falla		2	2	2	2	2	7	7
Impacto asociado de la falla al STO		13.28	13.28	13.28	13.28	13.28	16.8	16.8
		Interconexiones de las variables con las Fallas.						
Variables de entrada Sub Sistema	EPI	1	0	0	0	0	1	1
	PPM del EPI	0	1	0	0	0	1	1
	DPI	0	0	1	0	0	1	1
	LIPI	0	0	0	1	0	1	1
	PARED	0	0	0	0	1	1	1
	FER	0	0	0	0	0	1	1
	P safe	1	1	1	1	1	1	1
	Escenarios dentro de la falla		3	3	3	3	3	3
		Restricción para los escenario de falla EF ≤ 6						
Impacto (%)	Impacto del escenario 1	0 – 25 (0)	0 – 20 (0)	0 – 30 (0)	0 – 40 (0)	0 – 30 (0)	0 – 25 (0)	0 – 30 (0)
	Impacto del escenario 2	25.1 – 75 (1)	20.1 – 65 (1)	30.1 – 65 (1)	40.1 – 80 (1)	30.1 – 70 (1)	25.1 – 60 (1)	30.1 – 60 (1)
	Impacto del escenario 3	75.1 – 100 (2)	65.1 – 100 (2)	65.1 – 100 (2)	80.1 – 100 (2)	70.1 – 100 (2)	60.1 – 100 (2)	60.1 – 100 (2)
Impacto asociado de máximo 2 fallas al STO		AG	AG	AG	AG	AG	AG	AG
		Minimizar la gestión del Impacto asociado mediante un Algoritmo Genético.						



El AG, tardo 00.02-s, en encontrar la solución sub-óptima. Proveyendo las salidas, tres esquemas de escenarios de fallas (1, 2 & 6) que reúnen las características y restricciones establecidas (Met), minimizando impactos al sistema de transporte por oleoductos (ver tabla 31).

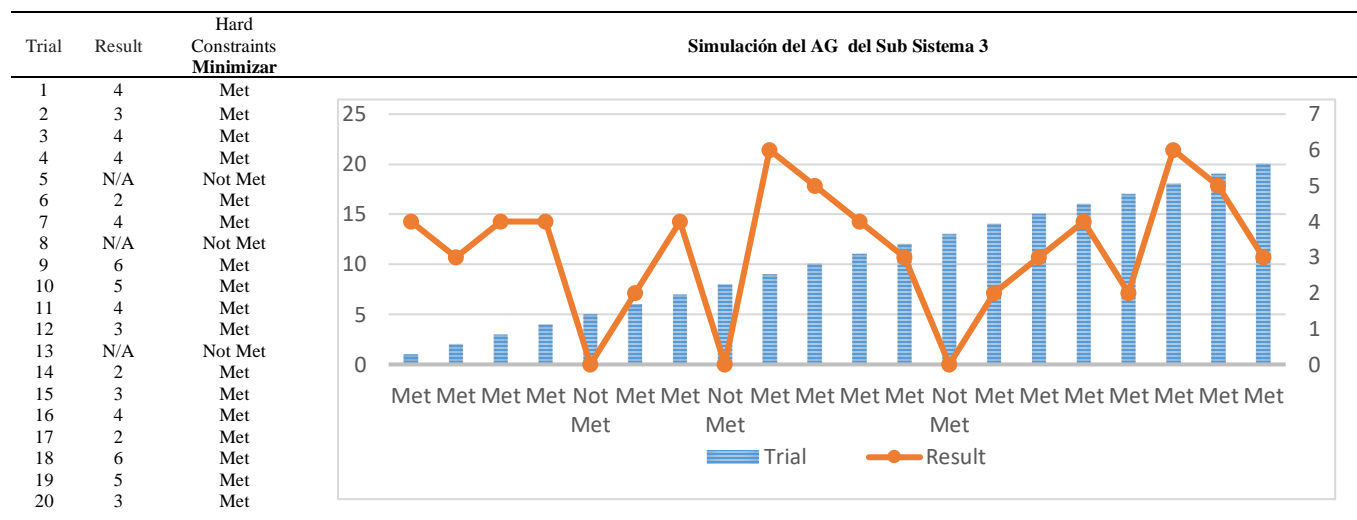
Tabla 31.

Resultados de Evolver para el sub sistema 1.

Trial	Elapsed Time	Result	Adjustable Cells												Hard Constraints minimizar
			C22	D22	E22	F22	C23	D23	E23	F23	C24	D24	E24	F24	
1	1.15741E-05	4	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	Met
2	2.31481E-05	3	0	0	0	0	1	1	1	1	2	3	2	2	Met
6	2.31481E-05	2	0	0	0	0	1	1	1	1	2	3	2	2	Met

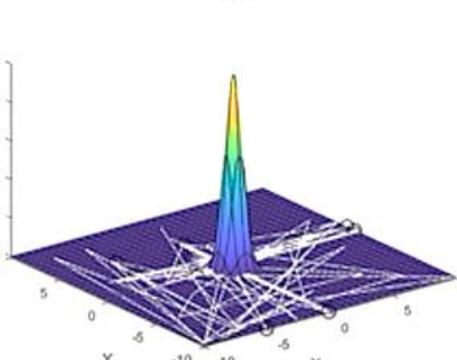
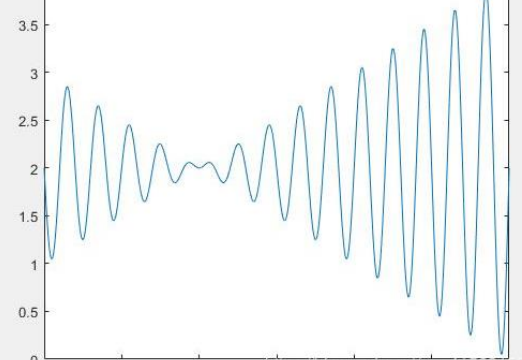
El comportamiento de la solución, a través del proceso de optimización, por medio de la metaheurística del AG, se vislumbra en la tabla 32, representando el comportamiento de 20 muestras de valores máximos y mínimos, esperados dentro de una población de 2000 muestras en un tiempo de optimización indeterminado.

Tabla 32. Simulación de Evolver para el sub sistema 1.



Se procedió a desarrollar la programación de un algoritmo genético a través de Matlab, para generar una conexión directa al SMT a PGCG, la tabla 33 muestra la estructura de programación segmentada en 10 puntos, partiendo de la selección de la población, procesos de conversión binarias y de mutación para alcanzar los resultados óptimos que establezca la función objetivo, cabe destacar que los datos empleados en Evolver de los sub sistemas 1 y 3 son los mismos para Matlab. El punto 9, nos permite observar el comportamiento del AG, identificando puntos óptimos y sub óptimos bajo una estructura binaria en un diagrama de superficie de respuesta mientras que el punto 10, grafica el comportamiento de los datos.

Tabla 33. Programación y resultados del Algoritmo genético en Matlab.

1.Programa Principal	2.Inicialización de población	3.Binario a Decimal	4.Calcular el valor objetivo de la función
<pre> funcion main() clear; clc; % Tamaño de la población popsize=100; % Longitud del código binario chromlength=10; % De probabilidad cruzada pc = 0.6; % Probabilidad de mutación pm = 0.02; % Población inicial pop = intpop(popsize,chromlength); for i = 1:100 % Calcular el valor de aptitud (valor de función) objvalue = cal_objvalue(pop); fvalue = objvalue; if fvalue == 0 fvalue = 0; end % Seleccionar operación newpop = seleccion(pop,fvalue); % Operación cruzada newpop = crossover(newpop,pc); % Operación de mutación newpop = mutator(newpop,pm); % Actualizar población pop = newpop; % Encuentra la solución óptima [bestindividual,bestfit] = bestfit(pop,fvalue); x2 = binary2decimal(bestindividual); x1 = binary2decimal(newpop); y1 = cal_objvalue(newpop); if mod(i,10) == 0 figure; plot(x1,'sin(10*pi*x)+2','l-1.2'); hold on; plot(x2,'r'); title(['El número de iteraciones es n = ' num2str(i)]); end end fprintf('The best X is -->%S, 2^n*x2); fprintf('The best Y is -->%S, 2^n*bestfit); </pre>	<pre> % Tamaño de población inicial % Variables de entrada: % popsize: tamaño de la población % de longitud cromática: longitud del cromosoma - >> longitud binaria transformada % Variable de salida: % pop: población function pop=initpop(popsize,chromlength) pop = round(rand(popsize,chromlength));% genera aleatoriamente una matriz 0,1 de filas de popsize y columnas de chromlength % Significa tamaño de cromosomas, cada cromosoma tiene códigos de longitud cromática % rand(3,4) genera números aleatorios entre 0-1 en 3 filas y 4 columnas % rand(3,4) % % ans = % % 0.8147 0.9134 0.2785 0.9649 % 0.9058 0.6324 0.5469 0.1576 % 0.1270 0.0975 0.9575 0.9706 % redondeo es redondeo % round(rand(3,4))= % 1 1 0 1 % 0 1 1 0 % 0 0 1 1 % Entonces, la población devuelta es que cada fila es un individuo y el número de columnas es la longitud del cromosoma </pre>	<pre> % Función binaria a decimal % Variables de entrada: % Población binaria % Variable de salida % Valor decimal function pop2 = binary2decimal(pop) [px,py]=size(pop);%px = popsize py = chromlength for i = 1:py pop1(:,i) = 2.^ (py-i). * pop(:,i);% Calcula cada columna, la primera columna es 2 ^ 9 * (0 o 1), la segunda columna es 2 ^ 8 * (0 o 1) end % sum(:,2) suma las filas para obtener el vector de columna Temp = sum(pop1,2);% suma las filas, el valor máximo es 2 ^ 10-1 = 1023 pop2 = temp ./ 1023-1;% convierte el valor en el rango de 1 a 2 </pre>	<pre> % Calcular el valor objetivo de la función % Variable de entrada: valor binario % Variable de salida: valor de la función objetivo function [objvalue] = cal_objvalue(pop) x = binary2decimal(pop); % Convertir un número binario al valor del rango de variación de la variable x % Traiga el valor del cromosoma, calcule el valor de la función objetivo, que es el valor de aptitud objvalue = x * sin(10*pi*x)+2; </pre>
<p>5. Seleccionar operación</p>	<p>6.Transversal</p>	<p>7.Operación de mutación</p>	<p>8.Encuentra la función objetivo óptima</p>
<pre> % Seleccionar operación % Variable de entrada: población binaria pop, valor de ajuste: valor de aptitud % Variable de salida: newpop selecciona la población binaria futura function [newpop] = seleccion(pop,fvalue) % Construir ruleta [px,py] = size(pop); totalfit = sum(fvalue);% suma todos los valores de aptitud p_fitvalue = fvalue ./ totalfit;% calcula la relación entre cada valor de aptitud y la suma de los valores de aptitud p_fitvalue = cumsum(p_fitvalue);% de probabilidad suma y ordena y suma al siguiente valor % suma acumulada acumulada % cumsum(A) devuelve la suma acumulada a partir de la primera dimensión de A cuyo tamaño no es 1 % Por ejemplo, A = [0.1 0.1 0.1 0.2 0.3 0.2] luego regresa [0.1 0.2 0.3 0.5 0.8 1] ms = sort(rand(px,1));% ordenar de pequeño a grande % rand(i,j) devuelve una matriz aleatoria i * j, los elementos de la matriz están entre [0,1) % sort(x) organiza cada columna de la matriz x de pequeña a grande fitin = 1; newwin = 1; while newwin < px if (ms(newwin) < p_fitvalue(fitin)) newpop(newwin,:) = pop(fitin,:);% elige un valor mayor newwin = newwin+1; else fitin = fitin+1; end end </pre>	<pre> % Transversal % Variables de entrada: pop: número de población padre binario, pc: probabilidad de cruce % Variable de salida: newpop: número de población después del cruce function [newpop] = crossover(pop,pc) [px,py] = size(pop); newpop = ones(size(pop));% Genera una matriz px * py con todos los valores 1 for i = 1:2; px-1;% Selecciono dos cromosomas adyacentes para emparejar if (rand < pc)% juzgar si se satisface la probabilidad cruzada % Establecer al azar un punto de cruce cpoint = round(rand * py);% redondeo de redondeo % Cruce entre dos cromosomas adyacentes newpop(i,:) = [pop(i,1:cpoint),pop(i+1,cpoint+ 1:py)];% newpop(i,:) es la i-ésima línea newpop(i+1,:) = [pop(i+1,1:cpoint),pop(i,cpoint+1:py)]; else newpop(i,:) = pop(i,:); newpop(i+1,:) = pop(i+1,:); end end </pre>	<pre> % Operación de mutación % Variables de entrada: pop: población binaria, pm: probabilidad de mutación % Variable de salida: población después de una nueva mutación pop function [newpop] = mutation(pop,pm) [px,py] = size(pop); newpop = ones(size(pop)); for i = 1:px if (rand < pm) mpoint = round(rand * py); if mpoint <= 0 mpoint = 1; end newpop(i,:) = pop(i,:); % Mutaciones if newpop(i,mpoint) == 0 newpop(i,mpoint) = 1; else newpop(i,mpoint) == 1 newpop(i,mpoint) = 0; end end end newpop(i,:) = pop(i,:); end </pre>	<pre> % Busque una función de fitness óptima % Variables de entrada: pop: población, valor de ajuste: aptitud de la población % Variables de salida: bestindividual: best individual, bestfit: mejor valor de aptitud function [bestindividual,bestfit] = bestfit(pop,fvalue) [px,py] = size(pop); bestindividual = pop(1,:); bestfit = fvalue(1); for i = 2:px if fvalue(i) > bestfit bestindividual = pop(i,:); bestfit = fvalue(i); end end </pre>
<p>9. Simulación del Algoritmo Genético.</p>		<p>10.Resultados</p>	
			

4.7 Etapa 6: Sistema de Análisis Estructural del Sistema de Transporte por Oleoducto (SAE – STO).

4.7.1 Sistema de soporte a la decisión para determinar el efecto del uso de mezclas de petróleo crudo en la corrosión de los aceros al carbono en la industria mexicana del petróleo y el gas.

El desarrollo de un (SAE – STO), con lleva el uso y la diversificación perspectiva de herramientas, así como tecnologías, para solucionar una problemática. Se procedió a desarrollar un sistema de soporte a la decisión para determinar el efecto del uso de mezclas de petróleo crudo en la corrosión de los aceros al carbono en el STO.

En resumen, la industria del petróleo y el gas es responsable de la planificación y el transporte de las mezclas de hidrocarburos mexicanos, el objetivo de su programa operativo es transportar 460,000 barriles diarios (BDT) de los cuales la compañía solo transporta 345,000, y aproximadamente 75,000 se deben a derrames, lo que es equivalente al 16.3% del programa diario, generando pérdidas económicas significativas. Actualmente, la compañía desconoce la confiabilidad operativa y mecánica de su sistema de transporte por oleoductos (STO), debido a la inminente formación interna y externa del fenómeno clasificado como corrosión. Esta investigación se lleva a cabo en el sector Mendoza, Veracruz, México, proponiendo un Sistema de Soporte a la Decisión (SSD) integrado por tres herramientas, y que obtendrá resultados de manera conjunta o individualmente según las necesidades de la empresa. Propone un Sistema Experto Difuso (SED) que diagnostica el estado actual del sistema de transporte, en base al estudio de integridad mecánica (EIM) del STO, con una tasa de éxito del 90.29%. Asimismo, una Red Neuronal Artificial (RNA) determina patrones de comportamiento de las variables de entrada y salida que causan corrosión dentro del STO, con un indicador de éxito del 95.34% en las pruebas. Finalmente, se realizó un análisis a través de Simulación Monte Carlo (SMC), que considera factores inciertos en aspectos técnicos, económicos y ambientales, para determinar las mejores estimaciones financieras bajo escenarios de riesgo en el STO, con valores que oscilan entre 58 y 253 millones de

dólares de los meses analizados. El SSD validado en México, tiene como objetivo aumentar la confiabilidad operativa, minimizando el porcentaje de corrosión producida por un barril de petróleo crudo en los aceros al carbono (PCPB). Con la incorporación del sistema desarrollado en los procesos de toma de decisiones de la empresa, se denota un control en la evaluación de la incertidumbre, así como importantes beneficios técnicos y económicos para la empresa.

La estructura del SSD se basa en la integración de tres técnicas: SED, para el modelado del conocimiento y la experiencia de los individuos, RNA, para la predicción de eventos a partir de la identificación de patrones de comportamiento y finalmente; la SMC, que analiza escenarios de riesgo en presencia de incertidumbre. Es importante destacar que el SSD puede trabajar de manera conjunta o separada, con el objetivo de alcanzar los resultados deseados por la empresa en el STO. En la Fig. 58 se presenta la metodología propuesta para el desarrollo del SSD.

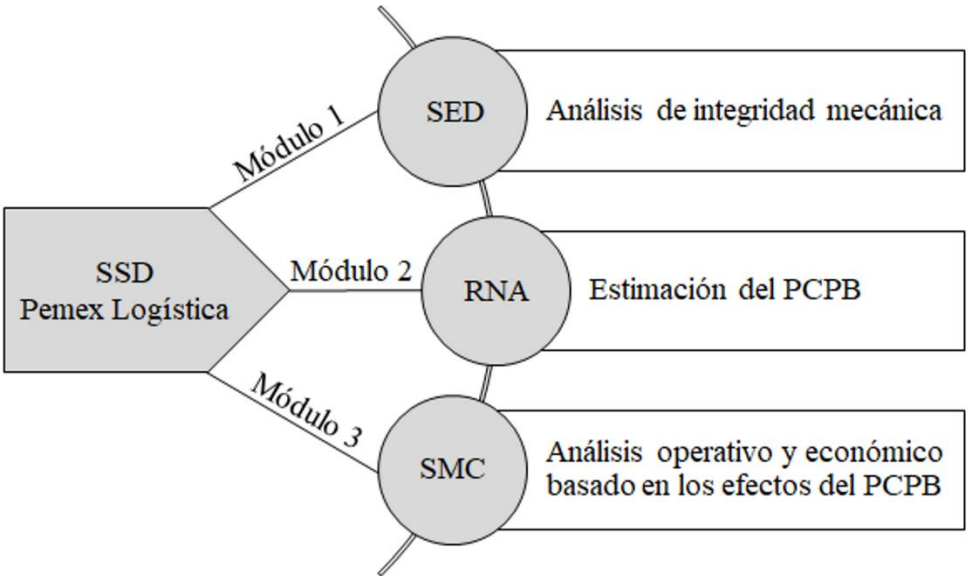


Figura 58. Metodología propuesta para el desarrollo del SSD. *Fuente: Elaboración propia.*

Como se menciona anteriormente, la estructura del SSD está basado en los siguientes tres módulos:

4.7.1.1 Módulo 1. Análisis de la integridad mecánica del STO mediante un SED

Con el SED, se analiza y determina el estado actual del STO del sector Mendoza en base a un estudio de integridad mecánica (EIM). La arquitectura del SED se basa en la experiencia de los especialistas del departamento de corrosión de Pemex Logística. La determinación de las variables de entrada y salida, consideran un enfoque con tendencia al riesgo, donde clasificamos nuestro sistema en dos categorías: Variables determinísticas (VDs) referente a las entradas y Variables inciertas (VIs) referente a las salidas. Las **VDs** se describen a continuación:

1. **EPI**, esta variable se define como el espesor de la pared interna de la tubería.
2. **PPM del EPI**, estipula el porcentaje del defecto asociado con adelgazamiento de la pared de una tubería por orígenes mecánicos, de manufactura o corrosión.
3. **LIP**, analiza los defectos en la pared interna de la tubería, asociados con discontinuidad en las capas metálicas en forma de inclusiones extrañas incrustadas en la estructura.
4. **ANPI**, identifica el ancho de la pared interna de la tubería.
5. **FER**, metodología establecida por la empresa para determinar procesos de reparación en la tubería.

Las cinco anteriores VDs, están fundamentadas por los estudios de la empresa ([Weatherford, 2011](#)) referente al STO. La norma [NOM-027-SESH-2010](#) sirvió de apoyo para establecer y estructurar los requisitos operativos, permitidos por la comisión reguladora de energía ([Pemex, 2017a](#)).

La variable incierta (VI); Análisis del STO con referencia al EIM manifiesta la confiabilidad estructural y operativa de la tubería en base a condiciones de uso con respecto al tiempo ([Weatherford, 2011](#)).

La arquitectura de las VDs y de la VI, se basan en la obtención de los parámetros extraídos del EIM del STO de Pemex Logística, enfocado al sector ciudad Mendoza, Veracruz (Weatherford, 2011) y en la experiencia de los especialistas del departamento de corrosión. Con ello se establecieron los parámetros del SED así como su clasificación lingüística y matemática del modelo tipo Mamdani empleado, a continuación se describe en la Tabla 34.

Tabla 34

Parámetros del SED.

Variables determinísticas (entradas)	Etiqueta lingüística	Función de membresía	Intervalo
EPI	Bajo	Trapezoidal	(0, 0.1, 5, 12)
	Promedio	Triangular	(5.1, 12, 15)
	Bueno	Trapezoidal	(12, 15, 20, 20.1)
	Bajo	Trapezoidal	(0, 0.1, 20, 50)
PPM del EPI	Promedio	Triangular	(20.1, 50, 60)
	Alta	Trapezoidal	(50.1, 60, 99.9, 100)
	Buena	Trapezoidal	(0, 0.1, 1000, 3000)
LIP	Regular	Triangular	(1000.1, 3000, 4000)
	Mala	Trapezoidal	(3000.1, 4000, 7999.9, 8000)
ANPI	Buena	Trapezoidal	(0, 0.1, 1000, 1500)
	Regular	Triangular	(1000.1, 1500, 2000)
	Mala	Trapezoidal	(1500.1, 2000, 2999.9, 3000)
FER	Menor a uno	Trapezoidal	(0, 0.1, 0.5, 1)
	Mayor a uno	Trapezoidal	(1, 1.01, 1.5, 3)
Variables inciertas (Salida)	Fuera de Operación	Trapezoidal	(0, 0.01, 0.29, 0.30)
	Deficiente	Trapezoidal	(0.30, 0.31, 0.49, 0.50)
Análisis del STO con referencia al EIM	Estable	Trapezoidal	(0.50, 0.51, 0.79, 0.80)
	Deseable	Trapezoidal	(0.80, 0.81, 0.99, 1)

La base de datos autorizada y empleada en la investigación por el departamento de corrosión, cuenta con 4072 datos de medición de integridad mecánica del STO, generados por el EIM, realizado por la empresa Weatherford en la región del sector Mendoza, Veracruz, con más de 543 km de oleoductos. La interacción de las VDs y la VI, estrictamente modelado por las reglas de inferencia establecidas por los especialistas en corrosión de Pemex logística, validaron el adecuado funcionamiento de las 162 reglas difusas decretadas. Se desarrollaron 4100 pruebas para evaluar la efectividad del SED con el objetivo de optimizar los resultados del estudio, tomando un enfoque de confiabilidad operativa en el STO.

Prueba no.1 del análisis del STO con referencia al EIM.

El comportamiento de las VDs con respecto a la VI se describe a continuación: EPI igual a 0.20 mm, PPM del EPI igual a 0.20 mm, LIP igual a 0.7 mm, con un ANPI igual a 1000 mm, y un FER menor a uno. El resultado de nuestra VI, establece condiciones deseables del STO con referencia al EIM, estimando un valor numérico del 90.1%. Como se muestra a continuación en la Fig. 59.

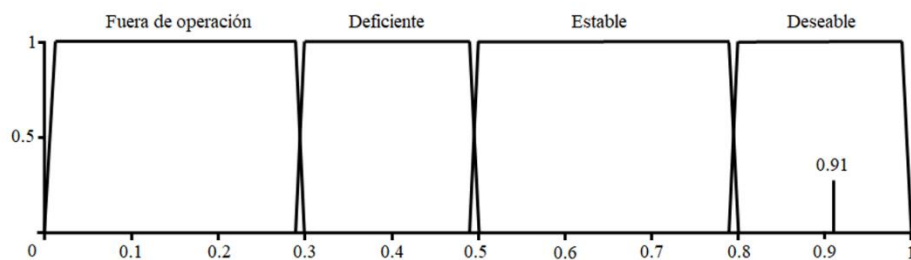


Fig. 59. Resultados de la prueba no. 1.

Con el uso del SED se minimiza la subjetividad operativa y se maximiza la planificación adecuada de los planes de mantenimiento, generando mayor confiabilidad al proceso de toma de decisiones. A continuación se muestra en la Tabla 35, un extracto de 30 pruebas de las 1070 desarrolladas para validar el funcionamiento del SED con respecto al EIM.

Tabla 35

Fracción de resultados de las pruebas del EIM de la empresa Weatherford contra el SED.

Pruebas	ResW	ResSED	Pruebas	ResW	ResSED	Pruebas	ResW	ResSED
1	76.8	77.4	11	71.2	71.5	21	4.1	4.8
2	43.1	42.8	12	46.2	47.9	22	69.2	68.9
3	89.5	91.1	13	80.0	80.5	23	71.9	70.0
4	52.3	52.7	14	72.0	72.9	24	15.5	15.3
5	89.8	90.1	15	89.8	90.1	25	93.8	94.0
6	34.5	34.8	16	59.3	59.8	26	77.1	76.8
7	67.1	67.2	17	22.8	22.2	27	22.1	22.1
8	84.9	85.0	18	88.1	88.3	28	81.0	80.8
9	15.5	15.3	19	12.7	12.0	29	50.7	51.2
10	99.8	99.2	20	94.1	95.0	30	95.1	95.6

Abreviaciones en la Tabla 2: ResW, Resultados de Weatherford; ResSED, Resultados del SED.

En la Fig. 60, se observa una correlación lineal positiva y un coeficiente de determinación del 0.9029, distinguiendo una alta tasa de correlación de efectividad en predicciones entre el SED y el sistema real del EIM. Según el nivel de confianza resultante, el SED está calificado para desarrollar funciones que faciliten la toma de decisiones planificando mantenimientos en base al EIM del STO del sector, así como evaluaciones y control del mismo con respecto al tiempo.

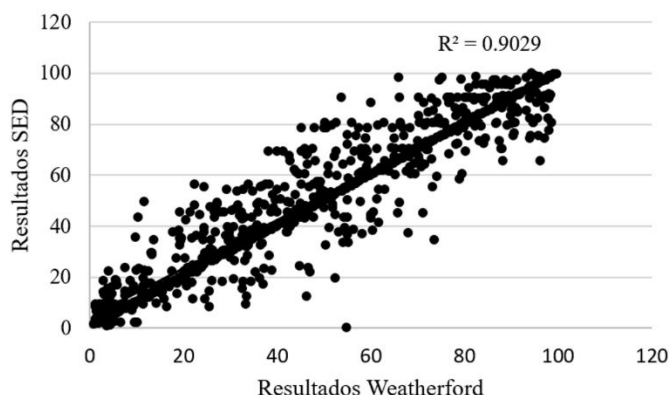


Fig. 60. Coeficiente de determinación del SED.

En la tabla 36, se ejemplifica con el SED una evaluación general y estructural estandarizando las condiciones actuales de trabajo del STO con referencia al EIM, obteniendo un 75.3% como resultado, determinando Pemex Logística que su sistema se encuentra trabajando de manera estable, al garantizar el transporte de 345,000 barriles diarios transportados (BDT). Sin embargo, no de manera deseable ya que al cumplir con esta condición el STO no lograría satisfacer la demanda establecida por el programa de 460,000 BDT.

Tabla 36

Resultados del SED

VARIABLES DETERMINÍSTICAS (ENTRADAS)	DATOS
EPI	12.6 mm
PPM del EPI	46%
LIP	3400 mm
ANPI	1789 mm
FER	Menor a uno
VARIABLE INCIERTA (SALIDA)	RESULTADO
Análisis del STO con referencia al EIM	75.3%

4.7.1.2 Módulo 2. RNA para estimación del porcentaje de corrosión producido por un barril de petróleo crudo (PCPB)

La RNA estima el porcentaje de corrosión dentro del STO del Sector Mendoza, por el uso de mezclas mexicanas de petróleo crudo (Istmo, Olmeca y Maya), para identificar el efecto progresivo que tienen las mezclas mexicanas de hidrocarburo al fenómeno adscrito como corrosión en los aceros al carbón como lo demuestran en su estudio (Hernández, Nešić, Weckman, & Ghai, 2006). En este módulo se utilizó una RNA con doce variables de entrada para predecir una variable de salida (PCPB), tomando como base datos históricos proporcionados por Pemex Logística y la Asociación nacional de ingenieros en corrosión (NACE). Con el fin de obtener predicciones adecuadas, se entrenan diversas redes partiendo de una red base hacia una red multicapa, que va del menor número de éstas a la que provea el mejor rendimiento, es una *feed-forward*, el tipo de red correspondiente, la arquitectura es una *Multilayer feed-forward* (MLP-*Multilayer Perceptron*, como generalmente se le conoce). Las redes MLP, son entrenadas habitualmente con el algoritmo de aprendizaje *BP*, así como una función de rendimiento MSE, la cual analiza las diferencias entre las salidas conocidas y las salidas estimadas por la red (Gardner & Dorling, 1998). Se establecen como variables de entrada de tipo numérico los principales componentes de las mezclas de hidrocarburos mexicanas:

- **Aromáticos**, son aquellos hidrocarburos que poseen las propiedades especiales asociadas con el núcleo o anillo del benceno.
- **Resinas**, espumas de aislamiento filtrantes para purificar el petróleo.
- **Saturados**, son derivados de los hidrocarburos mediante sustitución por flúor de todos o algunos de sus átomos de hidrógeno.
- **Asfálticos**, son polímeros aromáticos con muchos grupos alquilo de cadenas largas y algunos grupos polares.
- **Total de nitrógeno**, gas incoloro, inodoro e insípido, que constituyen las tres cuartas partes del aire.
- **Sulfuros**, es la combinación del azufre con un elemento químico o con un radical.
- **Total ácidos**, hidrocarburo que contiene gran cantidad de compuestos de azufre.

- **Vanadio**, elemento que se encuentra naturalmente en minerales y en los depósitos de combustibles fósiles.
- **Níquel**, elemento presente en pequeñas cantidades en el agua de mar, el petróleo y en la mayor parte del carbón.
- **Aceite crudo**, proviene de la cantidad de aceite de un yacimiento, después de pasar sobre un proceso de separación de cualquier gas asociado.

Las anteriores propiedades están basadas en el [\(INSSBT, 2017\)](#). Por otra parte, se encuentran también:

- **Densidad API**, escala de gravedad específica desarrollada por el Instituto Americano del Petróleo, para medir la densidad relativa de diversos líquidos de petróleo, expresada en grados [\(API, 2017\)](#).
- **Mejorador de flujo**, producto que optimiza o mantiene las propiedades de flujo en frío de los combustibles o hidrocarburos dentro de un sistema de transporte [\(Química Apollo, 2017\)](#), la cual es modelada en base a datos históricos de Pemex Logística.

En la Fig. 61, se muestra la arquitectura final de la RNA. Se recomienda repetir la etapa de entrenamiento hasta que los coeficientes presentes en la RNA sean superiores a 0.85 en las etapas de validación, prueba y entrenamiento [\(Dounia, Sabri, & Yassine, 2014\)](#).

Para asegurar que sea una predicción correcta se desarrolló un estudio de correlación, donde se observan los siguientes coeficientes: 0.9958 en entrenamiento y 0.9739 en pruebas, estos coeficientes son cercanos a 1 e indican claramente que el SSD es altamente confiable y puede ser utilizado con plena confianza. La RNA desarrollada contempla doce neuronas en su capa de entrada, seis neuronas en la capa oculta y una neurona para la capa de salida. En las cuales su estado de activación varía al ser de tipo continuo o discreto, con un régimen de transferencia de tipo lineal-mixta a fin de que las conexiones de transferencia tomen el peso deseado por la función de activación [\(Larochelle, Bengio, Louradour, & Lamblin, 2009\)](#).

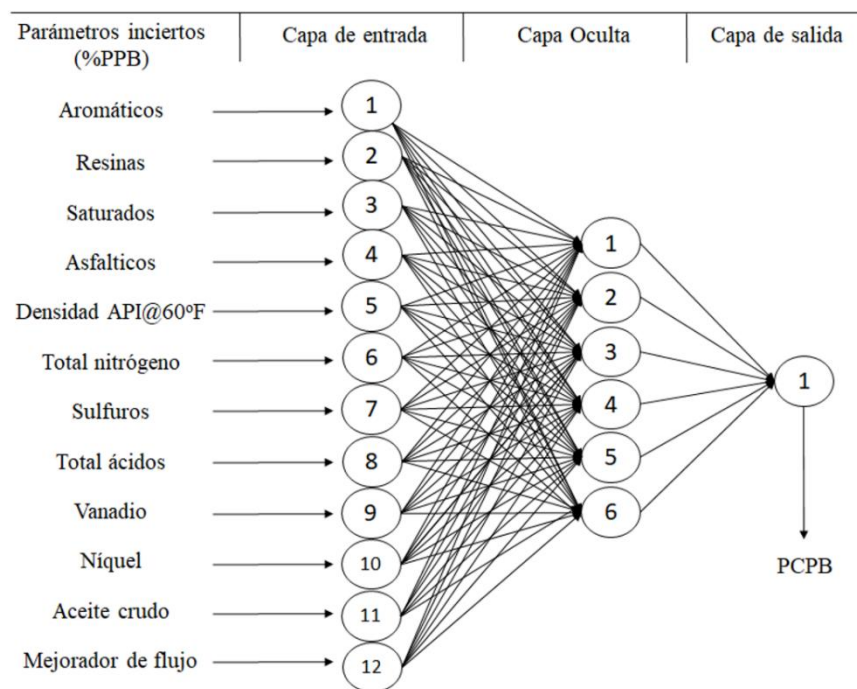


Figura 61. Arquitectura de la RNA. *Fuente: Elaboración propia.*

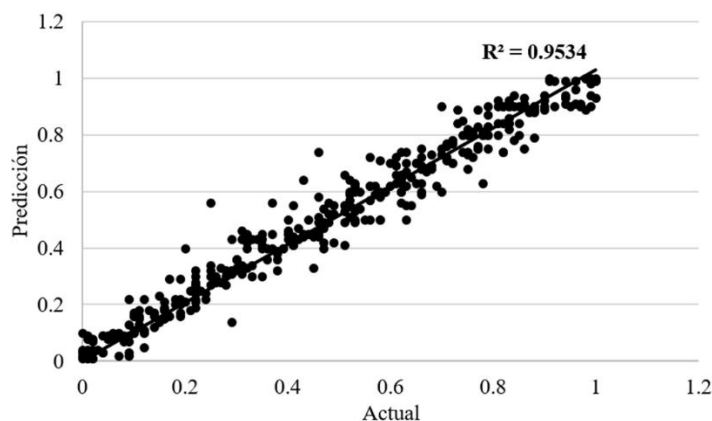
Se dispone de tres escenarios diferentes en tres tipos de mezclas mexicanas de petróleo (Istmo, Maya y Olmeca), provenientes de la base de datos de la NACE (Pemex, 2017a). Durante el entrenamiento, los 365 datos recibieron un tratamiento de normalización y desnormalización, obteniendo los valores esperados en el sistema real. En la Tabla 37, las columnas A, B y C muestran las salidas proporcionadas por la RNA y por el sistema real con valores similares. Con las estimaciones de los nuevos casos y debido a que en ésta investigación se tienen disponibles los valores reales del sistema validados por especialistas del área de corrosión, se estimaron tres diferentes escenarios de aplicación de las mezclas mexicanas como puede observarse en la Tabla 6: estimación con bajo porcentaje de aceite en el crudo y alto porcentaje de mejorador de flujo (columna A), estimación con medio porcentaje de aceite en el crudo y medio porcentaje de mejorador de flujo (columna B), y por último, estimación con alto porcentaje de aceite en el crudo y bajo porcentaje de mejorador de flujo (columna C), los cuales demuestran los diferentes comportamientos que pueden presentar las mezclas mexicanas de petróleo crudo en cuestiones de PCPB dentro de un STO.

Tabla 37

Fracción de resultados de predicción de la RNA y el sistema real en PCPB.

Bajo		Medio		Alto	
Real (A)	Estimación (A)	Real (B)	Estimación (B)	Real (C)	Estimación (C)
0.04	0.05	0.11	0.11	0.15	0.14
0.19	0.19	0.27	0.24	0.28	0.29
0.32	0.31	0.38	0.38	0.42	0.42
0.31	0.31	0.36	0.35	0.41	0.40
0.01	0.00	0.22	0.24	0.03	0.06
0.07	0.09	0.07	0.09	0.16	0.17
0.16	0.17	0.35	0.31	0.35	0.32
0.21	0.20	0.20	0.23	0.45	0.47
0.29	0.27	0.18	0.16	0.32	0.31
0.02	0.03	0.10	0.12	0.02	0.04
0.30	0.32	0.02	0.03	0.38	0.35
0.05	0.03	0.09	0.09	0.21	0.24
0.28	0.28	0.26	0.29	0.09	0.08
0.12	0.11	0.29	0.24	0.17	0.18
0.17	0.19	0.30	0.28	0.44	0.43
0.08	0.06	0.04	0.06	0.02	0.01
0.06	0.07	0.37	0.36	0.39	0.40
0.09	0.09	0.31	0.33	0.06	0.08
0.10	0.13	0.22	0.19	0.20	0.21
0.31	0.28	0.01	0.00	0.24	0.26

En total se entrenaron 43 redes, resultando se la configuración 40 como la mejor, con un porcentaje de aceptación del entrenamiento del 0.9658 y en las pruebas del 0.9534 como se indica en la Fig. 62, estos coeficientes son cercanos a 1 e indican claramente que el SSD es altamente confiable y puede ser utilizado con plena confianza.

**Fig. 62.** Resultados de las pruebas de la RNA.

Un Análisis de sensibilidad (AS) se aplica para identificar la relación de causa y efecto entre las entradas y salidas de la red (Hernández et al., 2006). En esta investigación se analiza el impacto que tienen las variables de entrada contra la variable de salida, arrojando resultados contundentes sobre su comportamiento. En la Fig. 63 se puede observar que el porcentaje de sulfuros (21.21%) y el contenido de Níquel (18.82%) tienen mayor impacto en el modelo, mientras que las diez variables restantes influyen de manera decreciente y poco significativa a la variable de salida (PCPB).

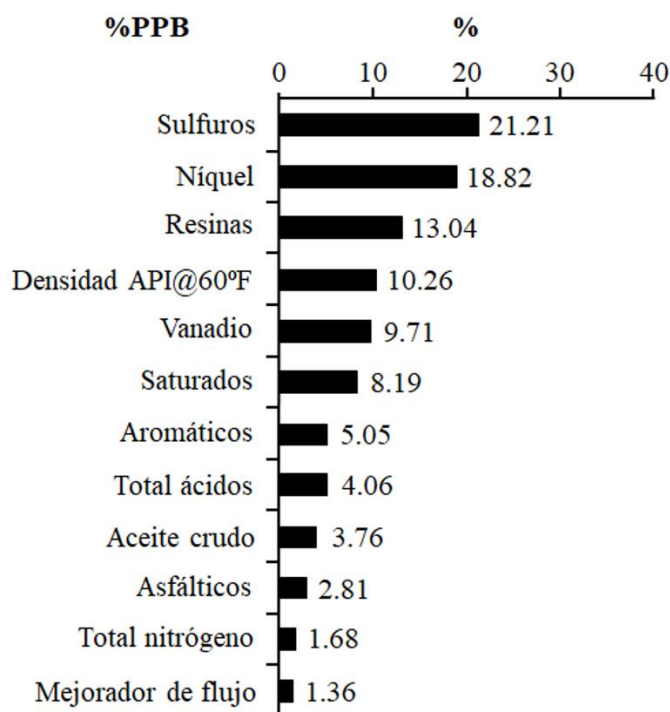


Fig. 63. Diagrama de tornado del impacto de las variables de entrada contra el PCPB.

El estudio muestra una nueva práctica en México al implementar sistemas inteligentes en áreas petrolíferas, que apoya el proceso de toma de decisiones dentro del sector energético. El análisis de los componentes que contienen los tipos de mezclas de hidrocarburo y su efecto en el PCPB, permite la disminución de problemas por corrosión a oleoductos, garantizando la integridad mecánica y estructural del STO del sector Mendoza, Veracruz de Pemex Logística.

4.7.1.3 Módulo 3. Análisis operativo y económico con SMC

La SMC determina un análisis de riesgo operativo y económico de los efectos de corrosión del STO basado en los efectos del PCPB, cada procedimiento se desarrolló de acuerdo a lo estipulado en el reglamento de la empresa (Pemex, 2017a). La metodología propuesta en esta sección consta de 4 etapas: Planeación, Preparación, Valoración y Mejoramiento. La metodología fue creada tomando los principios básicos de la técnica llamada flujos descontados, llevando la relación de cada uno de los diferentes costos a los parámetros inciertos, como se muestra en la Fig. 64.

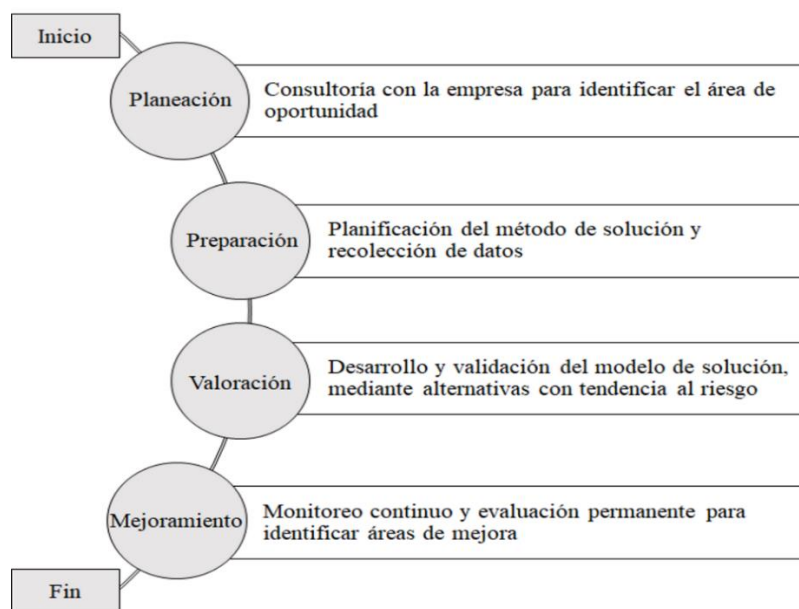


Figura 64. Metodología utilizada para la SMC *Fuente: Elaboración propia.*

Planeación - Para el análisis del porcentaje de producción de corrosión por barril de hidrocarburo transportado, bajo escenarios de riesgo, se establecieron los siguientes parámetros inciertos: corrosión por efectos del ambiente atmosférico, corrosión por efectos terrestres y corrosión por efectos acuáticos. Para el análisis de la aplicación adecuada del mantenimiento centrado en confiabilidad, se determinaron los siguientes parámetros inciertos: aplicación del mantenimiento preventivo a oleoductos, aplicación del mantenimiento bajo condiciones a oleoductos, aplicación del mantenimiento reactivo a

oleoductos y aplicación del mantenimiento proactivo a oleoductos, y para analizar la factibilidad económica del sistema de transporte por oleoductos, fueron considerados dos parámetros inciertos: efectos de la moneda de venta e inflación mundial de los precios de venta (Oferta y Demanda). Cada uno de los nueve eventos anteriormente mencionados, pertenece a una distribución de probabilidad triangular, como se muestra en los dos ejemplos de la Tabla 38, las cuales son asignadas por los expertos de Pemex logística, y que describen el comportamiento del sistema de transporte por ducto en base a efectos de corrosión.

Tabla 38

Fracción de valores de probabilidad de la distribución triangular para los nueve factores de riesgo.

Factor de riesgo	Peor de los casos	Más probable de los casos	Mejor de los casos
1. Corrosión por efectos del ambiente atmosférico	0.75 (Alta generación de corrosión por efectos de gases, polvo o por exceso de humedad en el aire)	0.65 (Generación de corrosión por efectos del ambiente atmosférico de la zona de trabajo)	0.35 (Generación mínima de corrosión por agentes atmosféricos)
	0.20 (Alta generación de corrosión por efectos de composición química del suelo o microorganismos)	0.65 (Generación de corrosión por efectos de resistividad terrestre de la zona de trabajo)	0.35 (Generación mínima de corrosión por agentes terrestres)

Preparación - En esta etapa se desarrolla un modelo conceptual que servirá como estructura para un modelo de SMC. Fue necesario realizar una cuantificación de la pérdida de barriles diarios de la mezcla de petróleo Istmo y Maya. Dado el análisis del STO, se empleó la cantidad de pérdida de los barriles de petróleo crudo, los cuales impactan directamente a los ingresos del producto interno bruto (PIB) por venta, extracción y distribución por barril de petróleo crudo, por lo cual se denominó como la utilidad generada por la venta de un barril de petróleo crudo (UVPC) en USD, con la validación de los expertos para reintroducir la pérdida económica al flujo normal diario de la empresa. La UVPC se obtiene de la siguiente manera:

$$UVPC = (\text{barriles totales de pérdida} * \text{utilidad por venta de barriles de petróleo crudo}) - (\text{barriles totales de pérdida} * \text{costos de extracción y distribución de petróleo crudo}) \quad (9)$$

Valoración - En esta etapa se realiza un análisis de riesgo y una validación de alternativas de solución para incrementar las ganancias de la empresa. Se analizaron escenarios para calcular la ganancia por extracción, distribución y venta de hidrocarburos a fin de producir el menor riesgo posible para generar pérdidas monetarias usando el software @Risk, el cual trabaja con la SMC.

Los parámetros determinísticos fueron identificados en esta problemática como elementos que por su naturaleza no cambian dentro del alcance de los diversos sistemas que conformarán al modelo, tal es el caso de los días inactivos del mes (fuera de operación), el precio de barril en USD, costos e ingresos de producción, extracción, venta por barril de hidrocarburo por la empresa y los impuestos aduanales de venta de hidrocarburo a nivel internacional. Con el apoyo de la base de datos de la empresa se inició el cálculo con las funciones de @Risk, para conocer la probabilidad estimada de obtener una mínima ganancia esperada, valuada por el programa de transporte diario establecido. En la Tabla 39 se muestra una fracción de la estructura de los valores del transporte mensual de barriles de petróleo crudo del primer trimestre del 2019.

Tabla 39

Fracción de datos del cálculo de integrados y pérdidas de marzo del 2017, con base al programa de transporte diario estimado.

Columna	1	2	1+2=3	4	4-3=5
Día	Integrado (BDT) L-24”Φ Est.5a “Maya”	Integrado (BDT) L-30”Φ Est.5a “Istmo”	Integrado final Est. 5a (BDT)	PET-PMX (BDT)	P-STO (BDT)
1	139,000	208,968	347,968	460,000	112,032
2	145,098	201,346	346,444	460,000	113,556
3	125,035	245,756	370,791	460,000	89,209
4	175,553	231,352	406,905	460,000	53,095
5	115,034	206,566	321,600	460,000	138,400
6	135,452	223,321	358,773	460,000	101,227
		Demanda mensual esperada		14,260,000	

Abreviaciones en la Tabla 15: PET-PMX, Programa de transporte establecido por la empresa; P-STO, Pérdida de producto del sistema de transporte de oleoductos. **Fuente:** [Pemex Logística, 2019.](#)

Se calculó la cantidad esperada a transportar cada mes, sumando los integrados, obteniendo como resultado un valor de 14, 260,000 barriles y se realizó el cálculo de una probabilidad triangular de cada uno de los nueve parámetros inciertos como apoyo para obtener un valor representativo de la existencia de cada uno de los posibles factores de riesgo. Por consiguiente, para calcular el ingreso parcial de cada mes, se sumó la ganancia obtenida en USD del mismo mes multiplicada por los barriles de petróleo crudo transportados en el sistema de oleoductos, con el ingreso al PIB por venta, extracción y distribución por barril de petróleo crudo en USD del mes anterior (ganancia por venta, extracción y distribución de producto por Pemex Logística dadas las condiciones del mercado internacional). El ingreso de venta, extracción y distribución utiliza la pérdida estimada de cada escenario, para calcular la utilidad neta del mes de trabajo obtenida por la empresa. El costo de extracción y distribución por barril de petróleo crudo fueron 12 y 20 USD respectivamente, como se muestran en la Tabla 40, los estados de resultados de la ganancia total obtenida por la empresa en el mes de enero.

Tabla 40

Ganancia total del mes de enero con base al valor de ingreso por reciclaje del mes de diciembre.

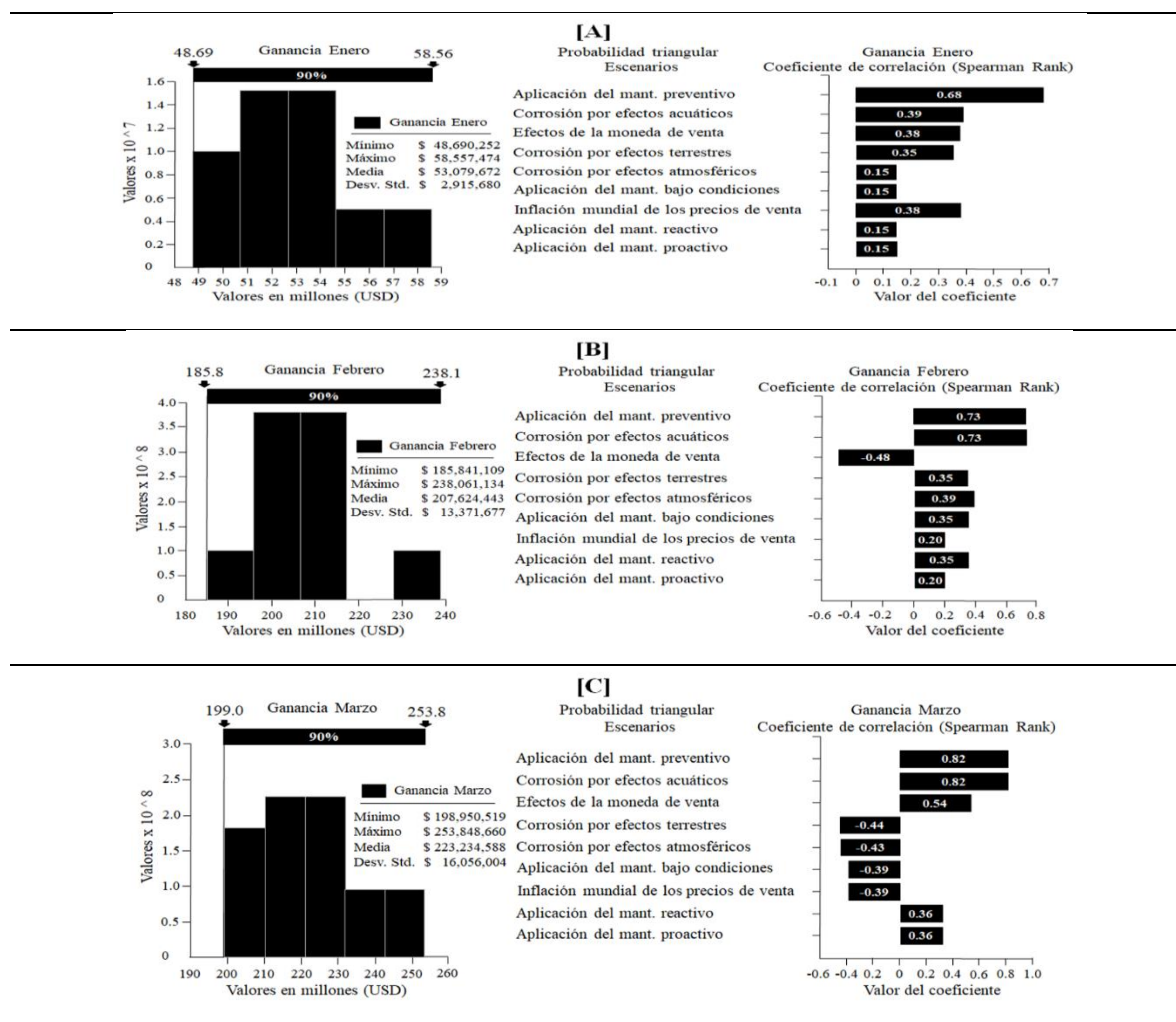
Diciembre	
Integrado total (BDT) de la estación 5a	Pérdida total (BDT) de la estación 5a
11,400,938	2,859,062
Enero	
Utilidad neta	274,264,612
Pérdida	60,065,127
Ganancia total de enero (USD)	214,199,484

Mejoramiento y resultados - En esta última etapa se realizó la interpretación de los resultados obtenidos, con los cuales se podrán hacer recomendaciones a los expertos de la empresa como apoyo a la toma de decisiones. Para conocer el impacto de cada uno de los nueve parámetros inciertos sobre los tres escenarios de simulación: enero, febrero y marzo, se analizaron los gráficos de correlación de Spearman, los cuales permitieron identificar las causas para proponer estrategias en la parte final de esta investigación. Se estableció que en esta etapa se llevará a cabo un primer experimento con cinco corridas del modelo de SMC, cada una para

los tres meses estudiados. En la Tabla 41 se observan los gráficos correspondientes al mes de enero (A), y se puede distinguir que con un 0.90% de probabilidad, este mes presenta una ganancia máxima de \$58.56 millones de dólares y una media de \$53.07 millones de dólares. El mes de febrero (B) incrementó la ganancia máxima aproximadamente un 400% con respecto al mes de enero, obteniendo un valor máximo de \$238.06 millones de dólares y una media de \$207.62 millones de dólares. El mes de marzo (C) se vio mayormente afectado por los nueve parámetros inciertos y presentó los valores más elevados en comparación de los dos escenarios antes presentados (enero y febrero), con \$253.84 y \$223.23 millones de dólares para la ganancia máxima y la media respectivamente.

Tabla 41

Gráficos de densidad y correlación de la ganancia de enero, febrero y marzo.



Se puede observar que los factores de riesgo que afectan más al mes de marzo (C) son la corrosión por efectos terrestres con una correlación de -44%, corrosión por efectos del ambiente atmosférico de -43%, aplicación del mantenimiento bajo condiciones de -39% y con un -39%, la inflación mundial de precios de venta (oferta y demanda). El mes de febrero únicamente se ve afectado de manera negativa por un parámetro incierto que fue el de los efectos de la moneda de venta de -48%.

4.7.1.4 Discusión del Sistema de soporte a la decisión para determinar el efecto del uso de mezclas de petróleo crudo en la corrosión de los aceros al carbono en la industria mexicana del petróleo y el gas.

El SSD propuesto es una herramienta de apoyo en la toma de decisiones sobre el estudio del comportamiento de la corrosión en los aceros al carbón con respecto al tiempo, está conformado por técnicas inteligentes que analizan aspectos técnicos, operativos y económicos, lo cual puede ser de gran utilidad en estaciones petrolíferas donde no existen especialistas. Lo anterior se debe a que toda la información, conocimiento y experiencia en el área de corrosión está incluida en este SSD. La aportación de esta investigación es una propuesta innovadora en el área de aplicación, ya que analiza factores de incertidumbre como variables de riesgo que no se habían utilizado en sistemas similares a los propuestos en este trabajo. El SED se estructura principalmente del EIM del STO (Sector Mendoza, Veracruz – Refinería Salina Cruz, Oaxaca) (Pemex, 2016a), considerado único e innovador en México por sus desarrolladores. Diversos sistemas inteligentes como redes neuronales artificiales e híbridos neuro-difusos han demostrado gran capacidad para predecir diversos tipos de fallas en el STO (Mohamed et al., 2017; Peng et al., 2009; Castellanos et al., 2011; Hernández et al., 2006), detección de fugas (Da Silva, Morroka, Guilherme, Da Fonseca, & Mendes, 2005), modelo difuso tipo Takagi-Sugeno en comparación con una RNA (Hajizadeh, 2007), y de igual manera una red bayesiana con un enfoque difuso para la evaluación de la seguridad en ductos (Kabir, Sadiq, & Tesfamariam, 2016), y usando un modelo matemático para evaluaciones de riesgo interno en gasoductos y oleoductos (Shabarchin & Tesfamariam, 2016).

Un método de computación suave fue diseñado tomando como enfoque una RNA y configurando como variables de entrada el pH de la mezcla, velocidad, temperatura y presión parcial para obtener el porcentaje de corrosión con tasas de éxito mayores al 99% en sus etapas de entrenamiento, validación y pruebas ([Chamkalani et al., 2013](#)), similar a la anterior investigación y anexando más valores de entrada [Supriyatman et al., \(2012\)](#) emplearon un modelo basado en una RNA, capaz de ajustar cambios en datos dinámicos en gasoductos.

Una RNA propuesta en esta investigación complementa al SSD para estimar el PCPB dentro del STO, capaz de identificar el efecto progresivo que tienen las mezclas mexicanas de hidrocarburo al fenómeno adscrito como corrosión en los aceros al carbón, desarrollando un análisis de impacto multi-variable del sistema, con índices de efectividad del 97.39%. De forma similar lo demuestran en su estudio [Weckman et al., \(2010\)](#) seccionando los resultados de salida en porcentuales generativos de corrosión y analizando los componentes de la mezcla de hidrocarburo al conjuntarse con los aceros al carbón. La conjunción de una RNA de tipo multicapa con un algoritmo de aprendizaje Levenberg-Marquardt también ha sido probado y validado en los trabajos de [Bassam et al., \(2009\)](#) y [De Masi et al., \(2014\)](#), un sistema generador de vectores (SVM) y un optimizador global denominado PSO fue comparado con una red neuronal de tipo BP, demostrando tener una mayor precisión y velocidad de predicción ([Liu, Wang, & Yuan, 2012](#)). Recientemente [Guzman & Aoyama \(2017\)](#) realizaron una comparación de métodos para la evaluación de riesgos en ductos con estimaciones económicas.

Con la implementación de la técnica SMC al SSD, se desarrolla un estudio fundamentado en el análisis de riesgo con el objetivo de reducir los costos innecesarios de mantenimientos con respecto al tiempo, evitando gastos innecesarios en infraestructura por problemas de corrosión, lo cual se refleja en indicadores de utilidad final de la empresa. Su eficacia internacional se demuestra en diversos estudios, analizando posibilidades de falla asociadas a corrosión en un STO, estructurando 4000 iteraciones de riesgo de falla, prediciendo un aumento generacional de fallas en el sistema del 73.2% en un lapso de 6 años. [Ossai \(2013\)](#) utiliza SMC con modelos de degradación para predecir la velocidad de corrosión de las tuberías con una precisión de entre 85.2- 97% y 83.3-98.6% respectivamente.

Los trabajos científicos discutidos en el estado del arte son diferentes casos de aplicación de sistemas inteligentes en todo el mundo, ya sea para evaluación y/o predicción de riesgos, entre otros factores, pero hasta hoy, ninguno había sido desarrollado en Pemex Logística en el área de corrosión a oleoductos. La principal ventaja del SSD, parte de analizar los efectos de transportar mezclas mexicanas de hidrocarburos, el cual puede variar en diferentes etapas (dependiendo el comportamiento de sus variables de entrada), dado el factor de las características físico-químicas del tipo de mezcla de hidrocarburo a transportar en el sistema de oleoductos, con lo que se deducen factores de tiempo, estudios de integridad mecánica, tipo y cantidad de barriles de petróleo crudo a transportar, así como la adecuada modelación con tendencia al riesgo en efectos de mantenimiento, entidades climatológicas y factores económicos que merman la utilidad final de la empresa. Para mejorar la tasa de éxito del SSD, hay diversas recomendaciones que podrían ayudar a minimizar errores de los tres módulos analizados. Primero los errores producidos en el SSD, los cuales podrían originarse por la falta de información para el manejo de las variables de entrada de los tres modelos (información deficiente o incompleta para las variables de entrada del SSD, lo cual reducirá la eficiencia del sistema). En segundo lugar, pueden existir fallas que pueden atribuirse a la necesidad de aumentar el número de variables pre establecidas en sus tres módulos (dada la implementación de nuevos factores, el SSD se denotará limitado y a su vez con necesidad de actualización dadas las nuevas incidencias en el sistema). El SSD fue propuesto a la empresa, con el fin de consolidar un proceso innovador en la toma de decisiones.

4.7.2 Sistema de soporte a la decisión para aumentar la confiabilidad operativa del sistema de distribución de hidrocarburos de la industria mexicana de petróleo y gas.

En resumen, el petróleo sigue siendo el principal combustible del mundo, y como fuente de energía no renovable, es esencial optimizar su uso para expandir las reservas naturales. Esta investigación se lleva a cabo en la industria mexicana de petróleo y gas, ubicada en Mendoza, Veracruz, México. Se propone un Sistema de soporte a la Decisión (SSD), para aumentar la confiabilidad operativa en la quinta subestación del sistema de transporte por oleoductos (STO). El SSD, se compone de dos técnicas: un Sistema experto difuso (SED) y una Red neuronal artificial (RNA). El SED muestra una tasa de correlación de 0.9501 para la capacidad de succión (CPS-TB) y 0.9442 para la capacidad de descarga de las turbo bombas (CPD-TB). El SED, está calificado para desarrollar funciones que faciliten la toma de decisiones para el personal operativo. La RNA, modela el comportamiento operativo del sistema utilizando el registro del programa operativo establecido (POE). Se obtuvieron altos porcentajes de aceptación, 0.9857 para entrenamiento, 0.9477 en pruebas y 0.9886 para validación. Un análisis comparativo muestra niveles de aceptación de 0.9767 y 0.9692 para la RNA vs. SED. El SSD, garantiza la confiabilidad de los límites operativos permitidos (LOP) de la compañía. Los resultados permiten mejorar las ganancias, maximizando el número de barriles diarios transportados (BDT), minimizando la incertidumbre operativa en toda su red de subestaciones. Generando una herramienta inteligente que facilita la comunicación hombre-máquina, estandarizando criterios de decisión para la operación de las turbos bombas, por parte de los operadores, debido a un aumento en la confiabilidad operativa al controlar la maquinaria. Lo que asegura el transporte de hidrocarburos, aplicable en campos internacionales.

La estructura del sistema de soporte a la decisión (SSD), se basa en la integración de dos técnicas de la inteligencia artificial, efectivas en la modelación del conocimiento y experiencia de los operadores de las turbos bombas, así como en la predicción de resultados.

Estas técnicas son la lógica difusa (LD), la cual capitaliza el conocimiento con base a la experiencia de los individuos que intervienen directamente en el sistema y las redes neuronales artificiales (RNA), que predicen un valor a través de datos históricos provenientes del sistema en estudio. La metodología para el desarrollo del SSD, se muestra en la figura 65.

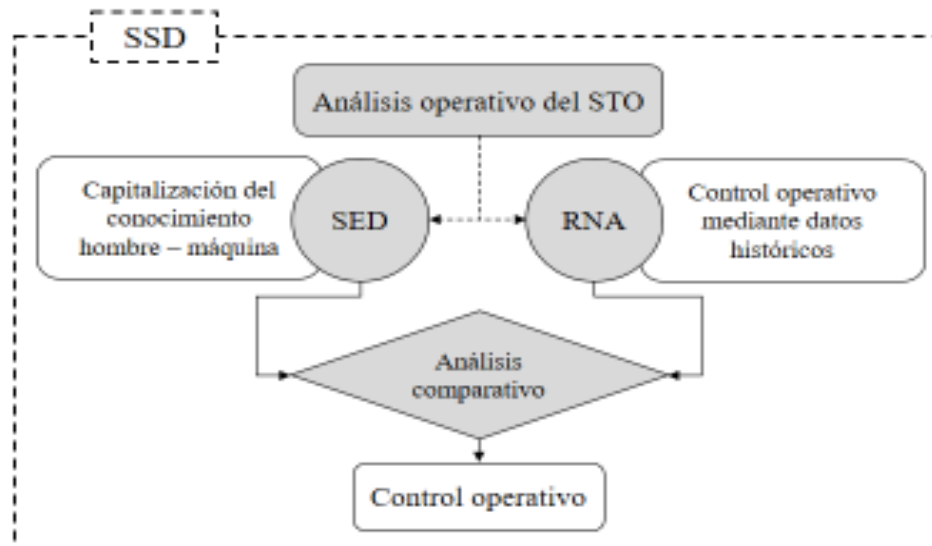


Figura 65. Metodología para el desarrollo del SSD.

Fuente: Elaboración propia.

La estructura del SSD, está basado en los siguientes cuatro módulos:

4.7.2.1 Módulo 1. Análisis operacional del STO.

Se analiza el funcionamiento operativo del STO y se determinan las variables a considerar con los expertos, para modelar adecuadamente el factor hombre – máquina. El caso de estudio se centra en la sub estación 5^a situada en cd. Mendoza, Veracruz considerada una estación de potencia entre la estación 5 de Zapoapita y la estación 6 de maltrata, ambas en el estado de Veracruz por su posicionamiento geográfico entre zonas montañosas ya sea para recibir o enviar productos petrolíferos.

El sistema de confiabilidad operativa de la empresa (SCO), considera la capacidad de un sistema productivo para cumplir su función sin fallas, dentro sus límites de diseño y bajo un contexto operacional establecido, para obtener los mejores resultados, basado en 4 elementos principales y 3 elementos de soporte, a continuación se muestra en la figura 66, el SCO, empleado en la empresa.

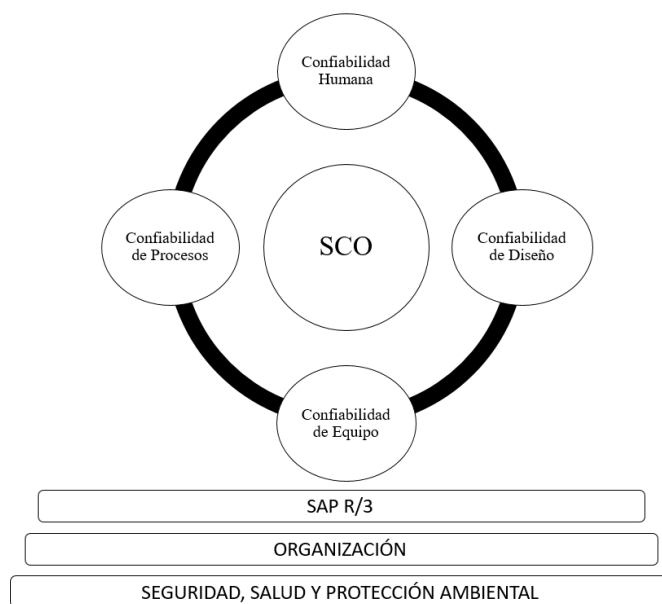


Figura 66. Sistema de confiabilidad operativa de Pemex Logística.

Fuente: Elaboración propia.

- **Confiabilidad Humana**, Establece los criterios de Conocimiento, motivación, destrezas y recursos del personal para desempeñar su trabajo.
- **Confiabilidad de Diseño**, Definición y aplicación de los criterios de mantenibilidad de equipos y STO, con el propósito de disminuir tiempos medios de reparación.
- **Confiabilidad de Equipo**, Asegura que los equipos y STO, operen sin fallas durante un tiempo predeterminado mediante la aplicación de herramientas de análisis, planes de administración de integridad mecánica y buenas prácticas de mantenimiento.

- **Confiabilidad de Procesos**, Asegura la operación según los parámetros de diseño, mediante entendimiento de los procesos y buenas practicas operacionales.
- **SAP R/3**, Soporta la gestión del negocio, a través de la información útil, completa y oportuna, generados en la cadena de valor de Pemex logística.
- **Organización**, Administración óptima de los elementos del SCO, con el fin de maximizar sus resultados.
- **SSPA**, Sistema de seguridad, salud y protección ambiental. (Pemex, 2017a).

Con la clasificación de los elementos del SCO y los procesos operativos actuales, se busca aportar mediante el SSD propuesto, la predicción del comportamiento de los elementos del STO, para eliminar los errores operativos que se generan en el área de trabajo por parte de los técnicos del área.

4.7.2.2 Módulo 2. Capitalización del conocimiento con el SED.

Modelación del conocimiento operativo del personal, considerando su experticia. La arquitectura del SED se basa en la experiencia de los especialistas del departamento de operación de Pemex Logística, a continuación, se ejemplifica la metodología empleada para la capitalización del conocimiento.

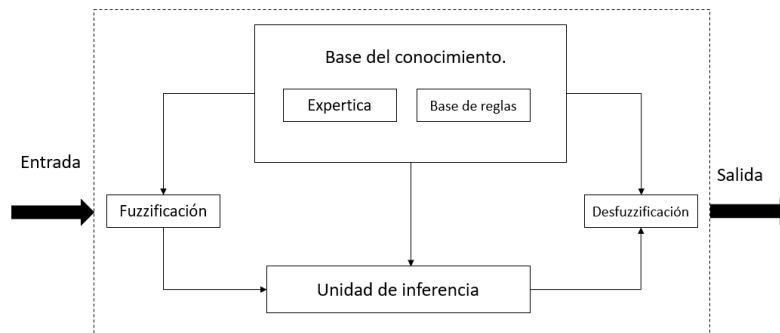


Figura 67. Capitalización del conocimiento del personal Pemex Logística.

Fuente: Elaboración propia.

Se clasifico el sistema en dos categorías: Variables determinísticas (VDs) referente a las entradas y Variables inciertas (VIs) referente a las salidas. Las **VDs** se describen a continuación:

1. **CPS-E6**, *Capacidad de presión de succión del integrado total (L-24"Ø u L-30"Ø) de la estación a recibir producto.* (Estación 6 Maltrata).
2. **CPD-E5**, *Capacidad de presión de descarga del integrado total (L-24" Ø u L-30"Ø) de la estación que envía el producto.* (Estación 5 Zapoapita).
3. **CO-E5^a** *Confiabilidad Operativa de la (Estación 5^a, CD. Mendoza).*

Las tres anteriores VDs, están fundamentadas con el apoyo de la empresa, para establecer y estructurar los requisitos operativos ideales de la estación 5^a, permitidos por la comisión reguladora de energía ([Pemex, 2017a](#)).

Las variables inciertas (VIs);

1. **CPS-TB**, *Capacidad de presión ideal de succión del integrado total (L-24" u L-30") de las turbo bombas de la Estación 5^a.*
2. **CPD-TB**, *Capacidad de presión ideal de descarga del integrado total (L-24" u L-30") de las turbo bombas de la Estación 5^a*

Las Vis, capitalizan el valor de incertidumbre que el operador de las turbo-bombas, debe controlar en tiempo y forma para deducir factores de riesgo, manifestando así la confiabilidad estructural y operativa del STO, para garantizar el cumplimiento del programa de transporte diario de hidrocarburo establecido por la empresa. ([Pemex, 2017a](#))

La arquitectura de las VDs y de la VI, se basan en la obtención de los parámetros operativos del STO de Pemex Logística, enfocado al sector ciudad Mendoza, Veracruz ([Pemex, 2017a](#)) y en la experiencia de los especialistas del departamento de operación.

Con ello se estructuró la arquitectura deseada (fig. 68) y los parámetros del SED así como su clasificación lingüística y matemática del modelo tipo Mamdani empleado, a continuación se describe en la Tabla 42.

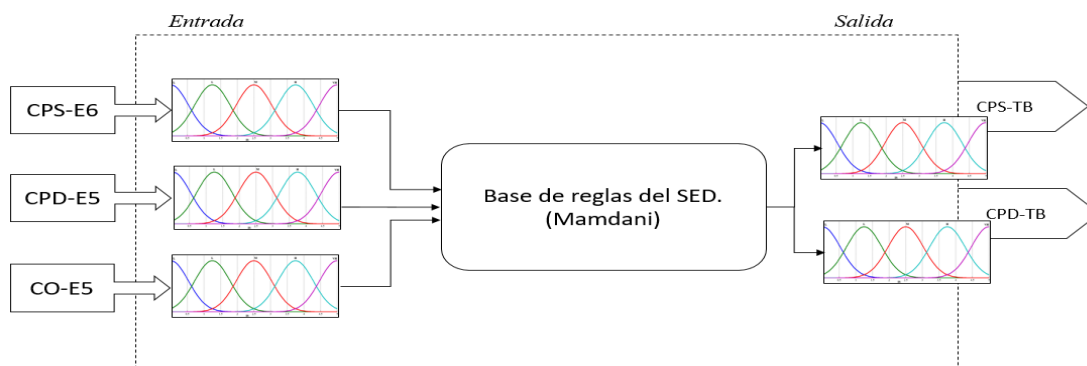


Figura 68. Arquitectura del SED. *Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 42

Parámetros del SED.

Variables determinísticas (entradas)	Etiqueta lingüística	Función de membresía	Intervalo
CPS-E6	Fuera de Operación	1-Gama	(0, 0.01, 3.99, 4.00)
	Baja	Trapezoidal	(3.99, 4.01, 18.49, 18.50)
	Promedio	Triangular	(18.49, 37.50, 55.50)
	Alta	Gama	(55.49, 55.51, 75.5, 85.5)
CPD-E5	Fuera de Operación	1-Gama	(0, 0.01, 3.99, 4.00)
	Baja	Trapezoidal	(3.99, 4.01, 20.10, 20.11)
	Promedio	Triangular	(20.10, 40.25, 60.37)
	Alta	Gama	(60.36, 60.39, 80.50, 90.50)
CO-E5 ^a	Fuera de Operación	1-Gama	(0, 0.01, 10.97, 10.98)
	Mala	Trapezoidal	(10.97, 11.00, 44.99, 45.00)
	Regular	Triangular	(44.99, 65.00, 80.00)
	Buena	Gama	(79.99, 80.01, 99.99, 100.00)
Variable incierta (Salida)	Fuera de Operación	1-Gama	(0, 0.1, 11.99, 12.00)
CPS-TB	Baja	Trapezoidal	(11.99, 12.01, 14.11, 14.12)
	Promedio	Triangular	(14.11, 28.25, 42.36)
	Alta	Gama	(42.35, 42.36, 56.50, 66.50)
CPD-TB	Fuera de Operación	1-Gama	(0, 0.01, 11.99, 12.00)
	Baja	Trapezoidal	(11.99, 12.01, 15.86, 15.87)
	Promedio	Triangular	(15.86, 31.75, 47.61)
	Alta	Gama	(47.60, 47.62, 63.50, 73.50)

Los gráficos de superficie de respuesta (GSR) permiten determinar la influencia que las variables de entrada pueden ejercer sobre la variable de salida, y el objetivo es maximizar la respuesta. Este análisis interpreta que si las combinaciones de estos niveles de variables activan una zona óptima (colores claros), entonces la interpretación es de buen rendimiento. Sin embargo, si las combinaciones de los niveles variables activan una zona no óptima (colores oscuros), esto significa que hay un rendimiento más bajo. En la Fig. 65, se muestran dos ejemplos de GSR desarrollados para el SED. Cuanto mayor sea la capacidad de descarga de la subestación que transporta el hidrocarburo (CPD-E5) y mayor será el valor de la confiabilidad operativa del sistema de transporte de la subestación. La estación que recibe el hidrocarburo (CO-E5a), logrará un mejor rendimiento en la variable de salida.

En este caso, el que aumenta su valor de productividad es la presión adecuada de succión de operación total de la subestación que recibe el hidrocarburo (CPS-E6). El gráfico [A] en la Fig. 69, se usa como un ejemplo específico. La variable de salida CPS-TB se estudia después de afectar dos variables de entrada del modelo; CO-E5^a y CPD-TB. Se puede ver que con la fiabilidad operativa de la subestación 5^a, de 80 kg / cm², que el SED considera "buena" y con un CPD-E5 de 70 kg / cm², que se considera "alta" según el modelo, se obtiene en la variable de respuesta (CPS-TB) con una capacidad de succión de hidrocarburos de 50 kg / cm² que se considera "Alta". Para el caso [B] del mismo gráfico, ambas variables de entrada del ejemplo anterior se ven afectadas, pero ahora con la segunda variable de respuesta CPD-TB.

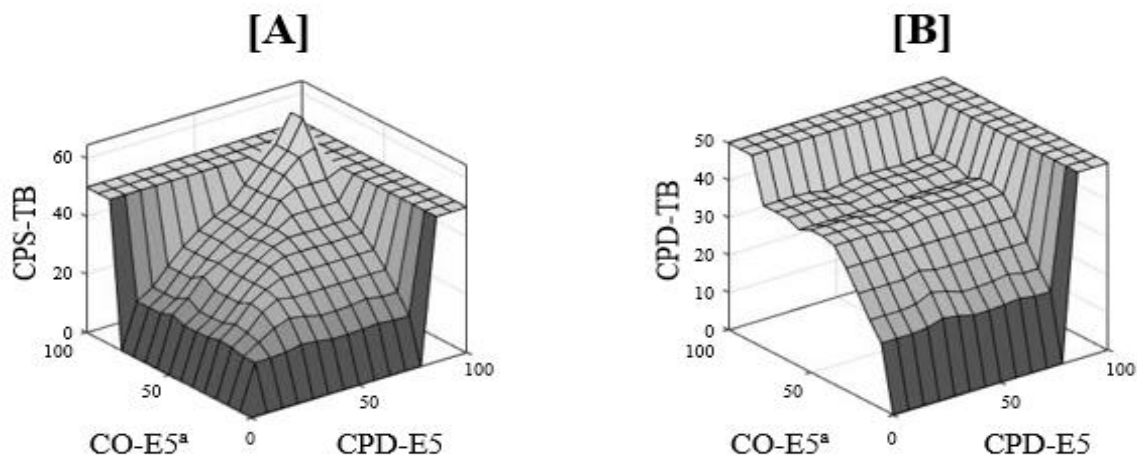


Figura 69. Gráficos de Superficie de respuesta del SED. *Fuente: Elaboración propia.*

4.7.2.3 Módulo 3. Interpretación de datos históricos empleando una RNA.

El sistema neuronal predecirá mediante una base de datos robusta, la tendencia operativa del STO, minimizando factores de control en el personal. Las RNA se utilizaron en esta investigación debido a sus numerosas ventajas, como la no linealidad, la adaptabilidad y el alto grado de robustez. El modelo estima los valores de CPS-TB y CPD-TB dentro del STO en la estación 5ª de la Industria Mexicana de gas y petróleo en Mendoza, Veracruz. Con esta herramienta, el comportamiento operativo del sistema se modela utilizando las bases de datos del registro operativo. Con el objetivo de reducir la subjetividad operativa de los recursos humanos mediante la interacción con la maquinaria. En la etapa 2, se realizó un análisis con el mismo propósito utilizando por el SED.

La RNA se desarrolló mediante una arquitectura de tipo perceptrón multicapa (MLP). Conformada por tres neuronas en su capa de entrada, dos neuronas en la capa oculta y dos neuronas para la capa de salida como se muestra en la figura 70. X_j son las variables de entrada, IW_{ji} son los coeficientes de los pesos de las neuronas j , b es sesgo, considerado como un valor sesgado al que permite ajustar los pesos de las neuronas para obtener un error de salida mínimo, e Y son los valores de salida. Este valor Y se obtiene a través de una función de tipo Sigmoide, ya que los valores iniciales se normalizan usando valores IW . El entrenamiento se realiza con el algoritmo de Levenberg-Marquardt y las diferencias entre los resultados conocidos y los resultados estimados se analizan utilizando, el error cuadrático medio (MSE).

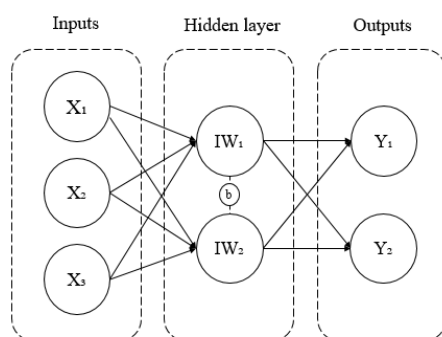


Figura 70. Arquitectura de la RNA. *Fuente: Elaboración propia.*

La RNA, empleada está compuesta por las mismas variables del SED (Tabla 43) realizadas en la etapa 2 de esta misma investigación, con la diferencia de que la red trabaja con datos históricos de la empresa y no con la experticia que maneja el SED. Las variables enfatizan su mecanismo de inferencia en la recopilación de información, el aprendizaje supervisado y la predicción del comportamiento operativo de la máquina a través de datos operativos históricos de la empresa. Varios escenarios se modelan como fuera de operación y condiciones de transporte bajas, promedio o deseables. El SSD integra la experiencia del recurso humano y los datos históricos de una compañía petrolera.

El procedimiento de pruebas y validación de la RNA, entreno 43 redes, obteniendo una tasa de aceptación de 0.9857 para entrenamiento, 0.9477 para pruebas y 0.9886 para validación (Fig. 71). Donde los coeficientes cercanos a 1 e indican que la RNA, es altamente efectiva y puede usarse con confianza.

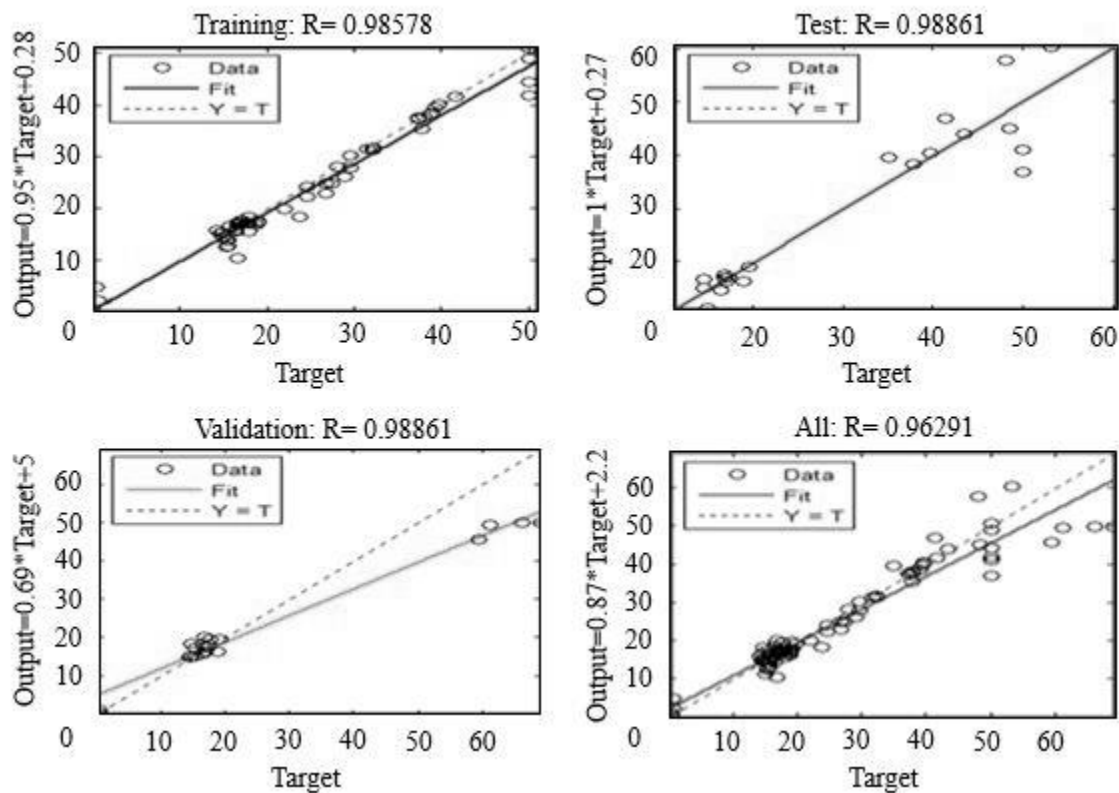


Figura 71. Pruebas y validación de la RNA. *Fuente: Elaboración propia.*

4.7.2.4 Módulo 4. Análisis comparativo de los sistemas inteligentes empleados

Se confrontaron los sistemas inteligentes empleados, analizando su efectividad en el caso de estudio empleado, considerando que cada procedimiento se desarrolló de acuerdo a lo estipulado en el reglamento de la empresa (Pemex, 2017a). En la Fig. 72, se muestra la correlación numérica (R^2) con 40 datos de cada una de las salidas. Se obtuvo un nivel de aceptación de 0.9767 para la RNA vs SED en su variable incierta CPS - TB [A], y de 0.9692 para la RNA vs SES en su variable incierta CPD - TB [B], con respecto a los valores proporcionados como históricos (RNA) y basados en la experticia de los operadores (SED). Es por esta razón que después de llevar a cabo este proceso en varias pruebas, se determina que los valores generados por los sistemas inteligentes son confiables y permitidos para su uso operativo dentro del SSD.

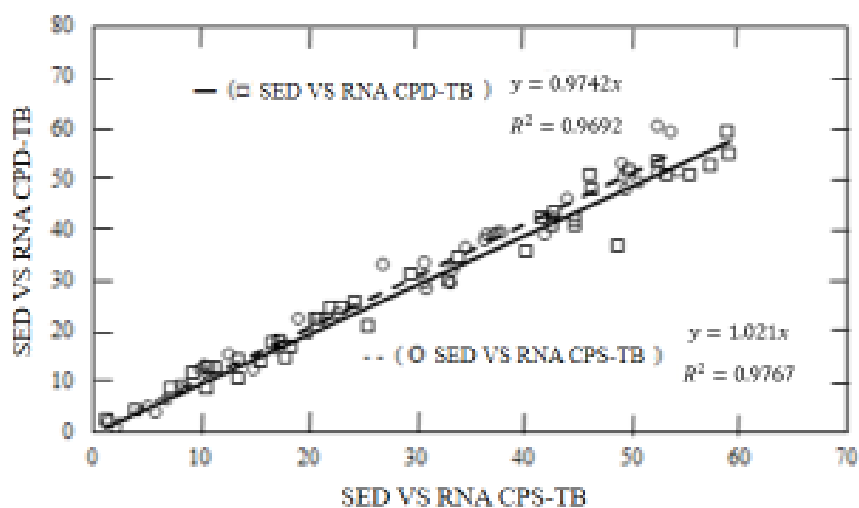


Figura 72. Fracción de resultados de las pruebas en las salidas de la RNA vs SED (Kg / cm²). *Fuente: Elaboración propia.*

4.7.2.5 Discusión del Sistema de soporte a la decisión para aumentar la confiabilidad operativa del sistema de distribución de hidrocarburos de la industria mexicana de petróleo y gas

El SSD diseñado en este artículo propone un sistema basado en un SED y una RNA, con el propósito de aumentar la confiabilidad operativa en las estaciones de bombeo que optimicen las capacidades de succión y descarga entre ellas para evitar la variación de capacidades que causan altas demoras en el sistema por tubería. En algunos artículos científicos, se han desarrollado SSD, compuestos de técnicas inteligentes que permiten mejorar el proceso de toma de decisiones, y estos han sido clasificados por (Arnott & Pervan, 2008) como sistemas inteligentes de soporte de decisiones (SSD) (Keramitsoglou, Cartalis, & Kassomenos, 2003) y (Leifer et al., 2012), El último caso se aplicó al derrame de Deepwater Horizon (DWH). Algunas investigaciones en el sector petrolero aportaron enfoques para la mejora de procesos, basados en agentes inteligentes. (L. B. Sheremetov, Contreras, & Valencia, 2004) diseñan un sistema de gestión de contingencias (CMS), (Yam, Tse, Li, & Tu, 2001) desarrollaron un sistema inteligente de soporte de decisiones predictivas (IPDSS) para el mantenimiento basado en condiciones (CBM) y (Dey, 2004) presenta un IDSS basado en riesgos que utilizan el proceso de jerarquía analítica (AHP) para la inspección y mantenimiento de oleoductos. Dentro de las múltiples aplicaciones de los SSD, también se han implementado para planificar los recursos humanos en las compañías petroleras, proporcionando requisitos de mano de obra, reclutamiento, colocación, promoción, evaluación y desarrollo (Mohanty & Deshmukh, 1997).

Algunas contribuciones de SSD apoyadas por LD, fueron creadas por (Gorgulu & Akilli, 2016), (Ghallab, Badr, Hashem, Salem, & Tolba, 2013). De manera similar (L. Sheremetov, Batyrshin, Filatov, Martinez, & Rodriguez, 2006) desarrolló un SED llamado Smart-Drill, que ayuda a los ingenieros petroleros a diagnosticar y resolver problemas de pérdida de circulación al perforar pozos petroleros. Con respecto a trabajos de SSD con RNA, varios autores se han aventurado en diversas aplicaciones, desde reducción de combustibles, predicción de flujo, hasta resultados de emisiones (Schocken & Ariav, 1994).

No solo de forma aislada se han llevado a cabo SSD, sino también con otras herramientas al mismo tiempo para lograr importantes contribuciones científicas. Se han hecho comparaciones entre SED y RNA para predecir el rendimiento y los parámetros de emisión en un motor de gasolina (Tasdemir, Saritas, Ciniviz, & Allahverdi, 2011), de la misma manera, se han integrado otras técnicas como en el trabajo de (Schipor, Geman, Chiuchisan, & Covasa, 2016), que desarrolló un sistema de terapia del habla asistida donde un SED y un RNA, se integran con resultados satisfactorios.

El objetivo de esta investigación es aumentar la confiabilidad operativa de la subestación 5a de la industria mexicana de gas y petróleo. Donde el proceso de re-bombeo puede estandarizarse para garantizar el mantenimiento adecuado del equipo auxiliar y los ductos que se conectan a la red de subestaciones. Para aumentar los indicadores de éxito y reducir los errores del SED y la RNA, se recomienda incluir más variables que puedan surgir debido a los nuevos incidentes del sistema, además, que los datos garanticen la representatividad y la coherencia. Los problemas relacionados con el petróleo presentan oportunidades excepcionales para pruebas de campo y usos de nuevas tecnologías. Además, al ser un recurso que mueve el mundo y que se pronostica que terminará, la investigación es de vital importancia para lograr el mayor progreso posible para maximizar su uso.

4.8 Etapa 7: Evaluación de impactos, resultados e identificación de actividades o procesos más significativos.

A continuación, se presentan los resultados de la investigación en base a los objetivos planteados, con la finalidad de identificar los procesos más significativos, así como delimitar alcances y resultados (Véase tabla 44 A & B).

Tabla 44-A

Parámetros planteados en la investigación.

<i>Objetivos</i>	<i>Resultados</i>	<i>Justificación</i>
Desarrollar un Sistema de Monitoreo Tolerante a Patrones de Comportamientos Generadores de Corrosión (SMT-PCGC) y la inclusión de un Sistema de Análisis Estructural al Sistema de Transporte por Oleoductos (SAE - STO), mediante técnicas de control e Inteligencia Artificial (IA), las cuales apoyen el proceso de toma de decisiones por medio de la modelación del sistema, lo que permitirá la localización de factores de riesgo.	✓	El SMT - PCGC & SAE - STO, mediante la integración de la IA, permitió identificar, diagnosticar, aislar y reconstruir diversos escenarios de falla, generados por la pérdida de propiedades de la tubería (Corrosión) a través de información de campo, laboratorio y conocimiento cognitivo, que maximizaron las capacidades operativas del PTS, generando nuevas prácticas replicables en todo el mundo.
Definir los alcances y objetivos del (SMT-PCGC & SAE-STO) a través de los requerimientos principales de los interesados y los requerimientos operativos para el establecimiento de los indicadores a tomar en consideración.	✓	Se establecieron los requerimientos para el desarrollo del SMT - PCGC & SAE – STO, analizando los resultados de los diferentes modelos de predicción & monitoreo de corrosión en la literatura (Pots & Kapusta, 2005; Rammay & Al-Nuaim, 2015; D. Supriyatman, Sumarni, Sidarto, & Suratman, 2012b), contra datos de campo del caso de estudio, demostrado que los resultados pueden variar considerablemente, lo que permitió establecer alcances, limitaciones así como las variables con mayor impacto en el sistema.
Identificación de fallas, PCGC, perturbaciones e incertidumbres asociadas al funcionamiento del STO (Análisis estructurado de fallas), con el objetivo de conocer sus variables y los factores inciertos que intervienen en el sistema.	✓	<p>La obtención de los datos cualitativos/cuantitativos y los procedimientos operativos establecidos del STO, permitieron determinar un modelo analítico, que clasificado por subsistemas identificaran variables y factores inciertos que intervienen en el sistema. El primer subsistema (Programa & Instrumentación operativa del STO), determino la interacción estructurada de fallas que pueden generar los equipos dinámicos, válvulas, sensores, la falta de comunicación entre otras.</p> <p>El segundo subsistema (Sistema de Protección Anticorrosiva), determino la interacción estructurada de fallas que pueden generar los rectificadores de voltaje, la variabilidad de potenciales y puentes eléctricos en un sistema de protección catódica, fallas en ánodos, cátodos, conexiones y conductores en mal estado, así como la agresividad corrosiva del suelo (pH), para propagar patrones generacionales de corrosión y deteriorar el recubrimiento mecánico de la tubería.</p> <p>El tercer subsistema (Integridad Mecánica), mediante Ultrasonic Intelligent Pigging Inspection, determino las fallas por afectación corrosiva interna y externa en la tubería, por indicaciones de pérdida de metal, agrietamiento y fracturas que establecen factores estimados de reparación en el sistema.</p> <p>El cuarto subsistema (Análisis Metalográfico), determino las fallas generadas por exceder los límites de diseño de la tubería, alteraciones micro estructurales, propiedades físicas, químicas y micro geométricas, que provoquen la fatiga o ruptura prematura del material, mediante pruebas de laboratorio estandarizadas internacionalmente.</p>

Tabla 44-B

Parámetros planteados en la investigación.

<i>Objetivos</i>	<i>Resultados</i>	<i>Justificación</i>
Desarrollar un (SMT-PCGC), basado en observadores en tiempo real (SCADA), mediante un sistema de control adaptativo para monitorear y reconfigurar el comportamiento del sistema, con el objetivo de garantizar la estabilidad operativa del STO en condiciones adversas de trabajo.	✓	Para generar una interconexión estable entre los sub sistemas del SMT a PCGC, se procedió a desarrollo un controlador neuro-difuso, con la finalidad de enlazar los comportamientos de las fallas con el sistema principal y determinar las condiciones operativas confiables de succión y descarga de producto de la estación de bombeo de hidrocarburo. Las capacidades de adaptación dinámicas que ofrecen los controladores inteligentes, facilitaron el proceso operativo de decisiones del STO ante condiciones de riesgo, el ANFIS procesa la información de salida que generan los 4 sub sistemas que conforman el SMT a PCGC mediante sus 24 escenarios de falla.
Analizar los posibles casos de reconfigurabilidad que puedan ser llevados a cabo en el sistema (análisis por componentes principales) así como estudiar el comportamiento del sistema: eficiencia/desempeño.	✓	Un Algoritmo genético genera los procesos de reconfigurabilidad del sistema considerando 11 firmas de falla únicas por su estructura residual el cual es capaz de minimizar su impacto operativo en el sistema al analizar su comportamiento.
Desarrollar un (SAE-STO) mediante dos Sistemas de soporte a la decisión inteligentes el primero para determinar el efecto del uso de mezclas de petróleo crudo en la corrosión de los aceros al carbón y el segundo para aumentar la confiabilidad operativa del sistema de distribución de hidrocarburos de la industria mexicana de petróleo y gas.	✓	El desarrollo del SAE – STO, genera una diversificación de herramientas inteligentes para solucionar problemáticas operativas, estructurales y financieras, simplificando así los procesos de toma de decisiones entorno al STO.
Analizar resultados obtenidos e identificar procesos más significativos en busca de aportes originales al estado del arte.	✓	El trabajo presentado no destaca por generar un alto impacto inmediato entre los asistentes, sino por establecer una visión integral que ayudará a reducir la pérdida de propiedades por corrosión en tuberías, debido a su capacidad para modelar, identificar y adaptar parámetros corrosivos conocidos, obtenidos a través de la experimentación de campo, laboratorio, datos históricos y conocimientos cognitivos, que establecieron una nueva posición del comportamiento corrosivo de la tubería ante las características físico-químicas del producto transportado, lo que permite establecer el uso de nuevos materiales, aleaciones, tratamientos térmicos, recubrimientos, protección catódica así como inhibidores que prolongan la integridad mecánica de un PTS deteriorado y vandalizado, mediante la gestión y planificación de mejores prácticas de decisión que, en colaboración con la inteligencia artificial, maximizan la confiabilidad del sistema.

4.9 Etapa 8: Discusión y conclusiones del proyecto de investigación.

La revisión literaria sistemática (RLS), permitió fundamentar e identificar las mejores alternativas, para garantizar el éxito de la metodología propuesta, para desarrollar los modelos híbridos multidisciplinarios. Fundamentados por los diversos tipos de corrosión existentes en los STD, en la industria del petróleo y gas (Mesquita et al., 2014; Patchigolla & Oakey, 2013), analizando y comparando modelos de predicción de corrosión lineales y no líneas empleados como herramientas de solución a las problemáticas, con el paso del tiempo (Braswell, 2013; Lopes et al., 2016; Mohaghegh et al., 2011), identificando el impacto de los sistemas de control y el monitoreo operativo en un STD, basado en el funcionamiento de las

teorías de control operativo vigentes, frente a las capacidades adaptativas que ofrece en la actualidad, el control tolerante a fallas (Costa Castelló et al., 2016) así como revelando nuevas prácticas de campo y laboratorio, mediante equipos de ultrasonido de haz recto, radiografías o equipos de simulación 3D (Nicola et al., 2013), metalografía, herramientas químicas, electrónicas o computacionales, para modelar adecuadamente el comportamiento de la corrosión y mitigar su afectación, son tomados en cuenta para el desarrollo del sistema propuesto.

La delimitación de los objetivos y alcances del proyecto de investigación, establecen los límites del sistema (ISO, 1998), donde las etapas, procesos y flujos que deben tomarse en cuenta para los límites del sistema (Roy et al., 2009): Justificando que el SMT a PCGC, se diseña con las capacidades de adaptación dinámicas ofrecidas por el control tolerante a fallas (Puig et al., 2004a, 2004b), mediante un sistema de adquisición remota de datos (SCADA) (Shafeek et al., 2004), técnicas de inteligencia artificial (IA) (Bassam & Hernandez, 2009; Hernández et al., 2005; Deden Supriyatman et al., 2012) estructurado por subsistemas y escenarios de fallo, soportado de observadores virtuales y algoritmos de diagnóstico para fallas en ductos (“Algoritmos de diagnóstico para fallas en ductos,” 2014; Costa Castelló et al., 2016) que analizan el comportamiento evolutivo de la corrosión.

Dentro del análisis y la estructura del sistema requerida para conformar el CTF, se consideran diversos factores, para comprender las diferencias entre los modelos de predicción de corrosión que se muestran en la revisión del estado del arte contra el SMT a PCGC, mediante una metodología que analiza de manera exhaustiva un STO, deteriorado y vandalizado en México, para determinar puntos críticos en el sistema, empleando equipos de flujo ultrasónico de inspección para analizar la integridad mecánica de la tubería, identificando zonas con mayor afectaciones así como parámetros estimados de reparación para el STO, mediante un análisis de componentes principales (Kishawy & Gabbar, 2010). El desarrollo de cálculos de Ph de suelos para determinar la agresividad corrosiva del suelo, el análisis del recubrimiento mecánico del ducto así como el estado de las camas anódicas, permitieron determinar parámetros de trabajo del sistema de protección anticorrosiva (Pots & Kapusta, 2005).

Mediante la conjunción de procedimientos metalográficos de laboratorio así como ensayos de tracción mecánica para determinar una caracterización confiable del material, bajo normativas internacionales (Angel & Toquiantzi Butrón, 2008; “API | Estándares,” 2017; ASTM, 2011; Casanova-del-Angel & Córdova-Castillo, 2018), han demostrado ser una fuente confiable de información para el SMT a PCGC, debido a diversos estudios analizados en la literatura, han demostrado que los resultados de laboratorio y campo pueden variar considerablemente, de no estar debidamente estandarizados los procesos (El-Abbasy et al., 2016).

El sistema de diagnóstico desarrollado, emplea algoritmos que parten de la caracterización del comportamiento nominal del fluido en el oleoducto (“Algoritmos de diagnóstico para fallas en ductos,” 2014). Representado a partir de un análisis de correlación con 28 escenarios de falla, producidos mediante registros históricos, datos de campo, experimentación y experticia, mediante una matriz de firmas de fallo teórica \sum , obteniendo los mejores resultados de interacción entre fallas y residuos.

El sistema del análisis estructural del STO, determina el desarrollo de herramientas confiables y útiles para la empresa (Bal Beşikçi, Arslan, Turan, & Ölçer, 2015), fundamentadas en aplicaciones internacionales, que demuestran como los SSD puede asistir al personal de una empresa petrolífera, con la evaluación y control de la integridad mecánica de sus instalaciones con respecto al tiempo, así como un análisis técnico-económico de inversión y pérdidas futuras en la empresa. También facilita la estandarización de criterios de producción de corrosión, así como la minimización de errores analíticos para la adecuada aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad. Por otro lado, es importante destacar que el SSD no intenta sustituir la experiencia y los conocimientos de los especialistas en el área, ya que solo es una herramienta de apoyo para la toma de decisiones. La implementación de los SSD sólo requiere de equipo de cómputo con especificaciones básicas y software de tipo comercial, lo que facilita su utilidad en centros de distribución de oleoductos, refinerías, terminales de almacenamiento, entre otros. De igual forma, la interfaz gráfica empleada de Matlab es fácil de utilizar al igual que la paquetería Palisade de análisis de decisiones, por lo que su uso es altamente recomendado para los especialistas.

En general este documento, se han presentado los fundamentos, así como una aportación específica al conocimiento, a través de una metodología de diseño, de un SMT a PCGC & SAE –STO, mediante un análisis estructural robusto de un sistema complejo, deteriorado y vandalizado. La aportación al manejo de los sistemas y resultados existentes en el estado del arte, se genera con la integración datos de campo, laboratorio, histórico y experticia, para unificar criterios de decisión, capaz de identificar, diagnosticar, aislar y reconstruir diversos escenarios de falla, que garanticen la confiabilidad operativa del oleoducto y minimicen los efectos de riesgo generados por la corrosión.

RECOMENDACIONES

Se recomienda ampliar el trabajo presentado robusteciendo y actualizando las bases de datos empleadas en la investigación con la finalidad de mejorar las gestiones operativas, estructurales y financieras de la industria petrolera en México para generar un entorno de referencia con nuevas prácticas replicables en todo el mundo. El SMT a PCGC & SAE-STO, no buscan reemplazar el trabajo de los recursos humanos, sino que genera un apoyo que minimiza la subjetividad en los procesos operativos en escenarios de contingencia. Actualmente, la empresa utiliza bases de datos fuera de línea y utiliza los sistemas desarrollados como estrategia para capacitar y desarrollar nuevas habilidades con sus operadores, instrumentistas e ingenieros de línea. La representatividad y coherencia de los datos hacen imposible comparar directamente la investigación con otra actual. Sin embargo, el sector petrolero es un campo excepcional para probar nuevas tecnologías.

Contribución al conocimiento

A continuación, se menciona el Propósito, Diseño / metodología / enfoque, Hallazgos, Implicaciones prácticas, Originalidad / Valor, que generó la investigación.

Propósito – Desarrollar una metodología de diseño integral de un sistema de monitoreo tolerante a patrones de comportamiento generacionales de corrosión (SMT a PCGC), mediante el control tolerante a fallas (FTCS), que ayuda a identificar, diagnosticar, aislar y reconstruir diversos escenarios de falla, generados por la pérdida de propiedades de la tubería (Corrosión) a través de información de campo, laboratorio y conocimiento cognitivo, que mejoren las capacidades operativas del PTS.

Diseño / metodología / enfoque - La adaptabilidad dinámica de la Inteligencia Artificial (IA), permite diseñar estrategias de modelado por subsistemas, que se pueden replicar en todo el mundo, unificando conocimientos de protección catódica, pH de suelos, instrumentación, caracterización mecánica, inspección inteligente por ultrasonido, cromatografía, espectroscopia, metalografía, así como ensayos de tracción, de un PTS, deteriorado y vandalizado en México. A través de esta información se generan escenarios de falla, mecanismos de diagnóstico y un control adaptativo inteligente que permite monitorear los escenarios de falla en condiciones controladas y abiertas, con el objetivo de minimizar diferencias entre entradas y salidas estimadas por el sistema predictor y real. El (SMT a PCGC) desarrollado, gestiona nuevas prácticas operativas en ductos, bajo un enfoque integral que maximiza la confiabilidad operativa del sistema y minimiza la gestión de riesgos.

Hallazgos - El sistema desarrollado parte de la unificación de diversas fuentes de información confiables, lo que permite predecir el impacto de la corrosión, mejorar la integridad mecánica de la tubería y calcular la viabilidad económica asociada. Para incrementar la efectividad y reducir los errores de los subsistemas, se recomienda revisar frecuentemente el comportamiento de las variables, así como verificar y actualizar la base de datos constantemente para asegurar la representación y consistencia de los mismos.

No se establece un cálculo del beneficio neto de la investigación para determinar si alguna falla en componentes del SMT a PCGC, es aceptable según el estado actual del conocimiento, sino para interpretar los resultados presentados con flexibilidad y variabilidad, porque algunos criterios no cuantificables son importantes para evaluar el riesgo general, como el costo de proteger la vida y los ecosistemas.

Implicaciones prácticas - Este sistema se construyó a partir de un estudio de caso en la industria del petróleo y el gas en México, diseñado a través de la minería de datos y el conocimiento cognitivo de 74 especialistas en áreas de corrosión, integridad mecánica, mantenimiento, planificación, protección catódica y operación. El subsistema 1, conforma una extensa base de datos de control y administración de operación, mantenimiento e incidentes en SAP / R3. El subsistema 2, interpreta información y conocimiento de 564 Km de suelos, a partir del último estudio de protección catódica. El subsistema 3, está respaldado por datos 5661 en análisis de severidad de inspección interna utilizando equipos de inspección de tecnología de haz ultrasónico. El sub sistema 4, desarrolla diversos ensayos metalográficos en tramos de ductos API LX65 extraídos por fatiga operativa según normas ASTM. El subsistema 5, constituye información experimental sobre el comportamiento corrosivo de los principales hidrocarburos mexicanos clasificados como nafténicos, parafínicos y asfálticos ante los aceros al carbón.

Los resultados del SMT a PCGC, priorizan maximizar la confiabilidad operativa del PTS, considerando un abordaje integral del riesgo corrosivo, bajo diversas perspectivas nunca antes abordadas de manera conjunta en la literatura actual, donde además del interés académico, se espera que el trabajo tenga implicaciones positivas para la industria del petróleo y el gas, impulsando la investigación futura.

Originalidad / Valor – La tesis presenta un SMT a PCGC, que garantiza la confiabilidad operativa de un oleoducto y minimiza los efectos de riesgo que genera la corrosión, capaz de gestionar el conocimiento de los expertos involucrados en el problema, identificando los patrones de comportamiento de las variables involucradas a través de la minería de datos y

proyectando estilos operativos, que permitan unificar criterios de decisión en presencia de incertidumbre.

La originalidad del trabajo se centra en la capacidad de modelar, identificar, diagnosticar, aislar y reconfigurar los procesos operativos de un PTS ante la presencia de fallas adecuando estudios que evalúen la pérdida de propiedades de los aceros al carbono por corrosión en ductos a través de una perspectiva integral, que considera aportes de trabajos anteriores, que no busca un alto impacto inmediato. en la audiencia, a través de un sistema de control tolerante a fallas inteligente generando una nueva herramienta que permita al ingeniero de corrosión determinar las mejores decisiones ante el manejo del sistema, nuevos materiales, aleaciones, tratamientos térmicos, recubrimientos, manejo de lecho anódico así como inhibidores que prolongan la integridad mecánica del oleoducto, a través de la gestión y planificación de las mejores prácticas de decisión que, en colaboración con la inteligencia artificial, maximizan la confiabilidad operativa del sistema.

La investigación se divide en la Parte 1: Análisis del sistema. Donde se desarrolla la primera etapa del control, presentando un análisis de severidad estructural de los componentes del sistema principal desglosado por subsistemas: 1.- Programa & Instrumentación Operativa del PTS, 2.- Sistema de Protección Anticorrosiva, 3.- Integridad Mecánica, 4.- Análisis Metalográfico, 5.-Análisis cromatográfico y espectroscópico del hidrocarburo. En la parte 2: Diseño de sistema de diagnóstico & Mecanismos de tolerancia. Presentan el modelo analítico de los escenarios del sistema, así como la matriz de firma de falla teórica con la finalidad de identificar y aislar las fallas para cuantificar su impacto al sistema principal diagnosticando y midiendo su comportamiento a través de la modelación de los subsistemas con lógica difusa y minimizando su impacto mediante un algoritmo genético. En la parte 3: Diseño del supervisor, así como aplicación y test: Presenta el desarrollo del controlador principal de tipo neuro difuso encargado de activar los mecanismos de tolerancia diseñados para cada escenario de falla para su simulación y posterior aplicación al sistema real. Al demostrar la originalidad del trabajo en un contexto global, el SMT a PCGC es una contribución genuina al conocimiento actual.

PRODUCTOS GENERADOS

- **Artículo Publicado (Tipo Review):** “*Fault-tolerant control techniques, artificial intelligence and geographic location systems as tools to synthesize the impact of corrosion on the mechanical integrity of the pipeline transport system in the oil and gas industry*”, publicado en el “**Journal of Pressure Vessel Technology**” de la Editorial ASME Q2 con *Impact Factor de 1.22 DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4047880>*
- **Artículo Aceptado (Original):** “*Intelligent decision support system to determine the effect of the use of crude oil mixtures on the corrosion of carbon steels in the Mexican oil and gas industry (Part A)*”, publicado en el journal “**Corrosion Reviews**” de la Editorial De Gruyter, Q1 con *Impact Factor de 2.41 DOI: <https://doi.org/10.1515/correv-2021-0080>*
- **Artículo Publicado en Línea (Original):** “*An intelligent decision support system to increase the operational reliability of the hydrocarbon pipeline transport system of a Mexican Oil and Gas Industry*”, publicado en “**Journal of Intelligent & Fuzzy Systems**”, Q2 con *Impact Factor de 2.27 Vol. Pre-press, no. Pre-press, pp. 1-21, 2022 DOI: 10.3233/JIFS-212411*

BIBLIOGRAFIA

- Abayomi, E., Ayo, D., & Omowunmi, O. (2016). Above - Ground Pipeline Monitoring and Surveillance Drone Reactive To Attacks. In *3rd International Conference on African Development Issues*. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Yomi_Eluwande/publication/304833639_Above-Ground_Pipeline_Monitoring_and_Surveillance_Drone_Reactive_To_Attacks_and_Surveillance_Drone_Reactive_To_Attacks/links/577c27a008aece6c20fcd1a7.pdf
- Alabadí, D., & Blázquez, M. A. (2008). Integration of light and hormone signals. *Plant Signaling and Behavior*. <https://doi.org/10.4161/psb.3.7.5558>
- Algoritmos de diagnóstico para fallas en ductos. (2014). *Tecnología y Ciencias Del Agua*.
- Angel, F. C. del, & Toquiantzi Butrón, R. (2008). Corrosion phases of structural shapes exposed to the atmosphere. *Corrosion Science*. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.05.015>
- API. (2017). American Petroleum Institute. Standards.
- API | Estándares. (2017). Retrieved December 17, 2017, from <http://www.api.org/products-and-services/standards>
- Arnott, D., & Pervan, G. (2008). Eight key issues for the decision support systems discipline. *Decision Support Systems*, 44(3), 657–672. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2007.09.003>
- Artificial Neural Networks for Corrosion Rate Prediction in Gas Pipelines. (2012), (May), 2012.
- ASTM. (2011). E3-11 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens 1. *ASTM Copyright*. <https://doi.org/10.1520/E0003-11.2>
- ASTM. (2018). E45-18a Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. *ASTM International, West Conshohocken, PA, Wwww.Astm.Org*. <https://doi.org/10.1520/E0045-18A>
- ASTM E8. (2010). ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1. *Annual Book of ASTM Standards 4*. <https://doi.org/10.1520/E0008>
- ASTM Internaional. (2012). ASTM E140-12b. Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness,

- Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness. *American Society for Testing and Materials*. <https://doi.org/10.1520/E0140-12B.1>
- ASTM International. (2004). ASTM E 112-96(2004) Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. *Astm*.
- Bal Beşikçi, E., Arslan, O., Turan, O., & Ölçer, A. I. (2015). An artificial neural network based decision support system for energy efficient ship operations. *Computers and Operations Research*, *66*, 393–401. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.04.004>
- banxico. (2020). Banxico precios de la mezcla mexicana de petroleo Abril 2020. Retrieved from <https://www.banxico.org.mx/apps/gc/precios-spot-del-petroleo-gra.html>
- Bassam, A., & Hernandez, J. A. (2009). Artificial neural network for the evaluation of CO₂ corrosion in a pipeline steel, 773–780. <https://doi.org/10.1007/s10008-008-0588-1>
- Bassam, A., Ortega-Toledo, D., Hernandez, J. A., Gonzalez-Rodriguez, J. G., & Uruchurtu, J. (2009). Artificial neural network for the evaluation of CO₂ corrosion in a pipeline steel. *Journal of Solid State Electrochemistry*, *13*(5), 773–780. <https://doi.org/10.1007/s10008-008-0588-1>
- Biezma, M. V., Agudo, D., & Barron, G. (2018). A Fuzzy Logic method: Predicting pipeline external corrosion rate. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.05.001>
- Blanke, M., Christian Frei, W., Kraus, F., Ron Patton, J., & Staroswiecki, M. (2000). What is Fault-Tolerant Control? *IFAC Proceedings Volumes*. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37338-X](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37338-X)
- BP. (2017). *BP Statistical Review of World Energy 2017*. BP. London, England.
- Braswell, G. (2013). Artificial Intelligence Comes of Age in Oil and Gas. *Journal of Petroleum Technology*. <https://doi.org/10.2118/0113-0050-JPT>
- Canyurt, O. E., & Ozturk, H. K. (2008). Application of genetic algorithm (GA) technique on demand estimation of fossil fuels in Turkey. *Energy Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.03.010>
- Cao, A. L., Zhu, Q. J., Zhang, S. T., & Hou, B. R. (2010). BP neural network predictive model for stray current density of a buried metallic pipeline. *Anti-Corrosion Methods and Materials*. <https://doi.org/10.1108/00035591011075869>
- Casanova-del-Angel, F., & Córdova-Castillo, A. (2018). Metallography of an Underground

- Oil Pipeline. *Open Journal of Metal*. <https://doi.org/10.4236/ojmetal.2018.83003>
- Castellanos, V., Albiter, A., Hernández, P., & Barrera, G. (2011). Failure analysis expert system for onshore pipelines. Part - I: Structured database and knowledge acquisition. *Expert Systems with Applications*, 38(9), 11085–11090. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.153>
- Chamkalani, A., Nareh'ei, M. A., Chamkalani, R., Zargari, M. H., Dehestani-Ardakani, M. R., & Farzam, M. (2013). Soft computing method for prediction of co2 corrosion in flow lines based on neural network approach. *Chemical Engineering Communications*, 200(6), 731–747. <https://doi.org/10.1080/00986445.2012.717311>
- Comittee, A. (2004). Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials. *Annual Book of ASTM Standards*.
- Costa Castelló, R., Puig, V., & Blesa, J. (2016). Introducción a la Diagnósis de Fallos basada en Modelos mediante Aprendizaje basado en Proyectos. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2015.09.011>
- Da Silva, H. V., Morroka, C. K., Guilherme, I. R., Da Fonseca, T. C., & Mendes, J. R. P. (2005). Leak detection in petroleum pipelines using a fuzzy system. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 49, 223–238. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.05.004>
- De Masi, G., Vichi, R., Gentile, M., Bruschi, R., & Gabetta, G. (2014). A Neural Network Predictive Model of Pipeline Internal Corrosion Profile. *2014 First International Conference on Systems Informatics, Modelling, and Simulation*. <https://doi.org/10.1109/SIMS.2014.14>
- de Tuber\`ia, S. A. de C. V. (1991). *PMT*. Productora Mexicana de Tuber\`ia. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=p620AAAAIAAJ>
- de Waard, C., Lotz, U., & Dugstad, A. (1995). Influence of liquid flow velocity on CO2 corrosion: A semi-empirical model. In *CORROSION*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- de Waard, C., Lotz, U., & Milliams, D. E. (1991). Predictive model for CO2 corrosion engineering in wet natural gas pipelines. *Corrosion*. <https://doi.org/10.5006/1.3585212>
- demeq. (2005). *QS5*.
- Dey, P. K. (2004). Decision support system for inspection and maintenance: A case study of

- oil pipelines. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 51(1), 47–56.
<https://doi.org/10.1109/TEM.2003.822464>
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2005). *Sistemas de control moderno*. Pearson Educación S.A.
- Dounia, M., Sabri, D., & Yassine, D. (2014). Rainfall – Rain off Modeling Using Artificial Neural Network. *APCBEE Procedia*, 10, 251–256.
<https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2014.10.048>
- Dtsi. (2016). *Reporte de Estudio CIPS Realizado al Oleoducto 24 " Ø Nuevo Teapa – Tula PXR-OP-SCC-SUD-GCM-L-13-14*. Mendoza, Veracruz, México.
- Duda, Y., Govea-Rueda, R., Galicia, M., Beltraén, H. I., & Zamudio-Rivera, L. S. (2005). Corrosion inhibitors: Design, performance, and computer simulations. *Journal of Physical Chemistry B*. <https://doi.org/10.1021/jp0522765>
- Eckert, R. B. (2015). Emphasis on biofilms can improve mitigation of microbiologically influenced corrosion in oil and gas industry. *Corrosion Engineering, Science and Technology*. <https://doi.org/10.1179/1743278214Y.0000000248>
- Eckert, R. B., & Skovhus, T. L. (2016). Advances in the application of molecular microbiological methods in the oil and gas industry and links to microbiologically influenced corrosion. *International Biodeterioration & Biodegradation*. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.11.019>
- El-Abbasy, M. S., Senouci, A., Zayed, T., Parvizsedghy, L., & Mirahadi, F. (2016). Unpiggable Oil and Gas Pipeline Condition Forecasting Models. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000716](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000716)
- El sol de Puebla. (2019). In environmental emergency, 54 sites in Puebla due to oil spills. *June 30, 2019*. Retrieved from <https://www.elsoldepuebla.com.mx/local/en-emergencia-ambiental-54-sitios-de-puebla-por-derrames-de-hidrocarburo-3833691.html>
- G., C., & F., A. (2014). Corrosion Inhibitors – Principles, Mechanisms and Applications. In *Developments in Corrosion Protection*. <https://doi.org/10.5772/57255>
- García, E. A., & Frank, P. M. (1997). Deterministic nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis: A survey. In *Control Engineering Practice*. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(97\)00048-8](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(97)00048-8)

- Gardner, M. W., & Dorling, S. R. (1998). Artificial neural networks (the multilayer perceptron)—A review of applications in the atmospheric sciences. *Atmospheric Environment*, 32(14–15), 2627–2636. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00447-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00447-0)
- Ghallab, S. A., Badr, N., Hashem, M., Salem, A. B., & Tolba, M. F. (2013). A fuzzy expert system for petroleum prediction. *Recent Advances in Computer Science and Applications*, 70–75.
- Ghidaoui, M. S., Zhao, M., McInnis, D. A., & Axworthy, D. H. (2005). A review of water hammer theory and practice. *Applied Mechanics Reviews*. <https://doi.org/10.1115/1.1828050>
- Gorgulu, O., & Akilli, A. (2016). Use of fuzzy logic based decision support systems in medicine. *Studies on Ethno-Medicine*, 10(4), 393–403. <https://doi.org/10.1080/09735070.2016.11905512>
- Hajizadeh, Y. (2007). Neural networks can enhance fuzzy corrosion modelling. *Oil Gas European Magazine*. <https://doi.org/10.2118/106628-MS>
- Hernández, S., Nestic, S., Weckman, G., & Ghai, V. (2005). Use of artificial neural networks for predicting crude oil effect on CO₂ corrosion of carbon steels. *Corrosion 2005*. <https://doi.org/10.5006/1.3279905>
- Hernández, S., Nešić, S., Weckman, G., & Ghai, V. (2006). Use of artificial neural networks for predicting crude oil effect on carbon dioxide corrosion of carbon steels. *Corrosion*, 62(6), 467–482. <https://doi.org/10.5006/1.3279905>
- Infobae. (2018). Un derrame petrolero en México provocó la muerte de especies y graves daños ambientales. Retrieved from <https://www.infobae.com/america/mexico/2018/10/08/un-derrame-petrolero-en-mexico-provoco-la-muerte-de-especies-y-graves-danos-ambientales/>
- INSSBT. (2017). Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Institute, A. P. (2007). API 5L Specification for line pipe. *Api Spec 5L*. <https://doi.org/10.1520/G0154-12A>
- Kabir, G., Sadiq, R., & Tesfamariam, S. (2016). A fuzzy Bayesian belief network for safety assessment of oil and gas pipelines. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(8), 874–889. <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1053093>
- Keramitsoglou, I., Cartalis, C., & Kassomenos, P. (2003). Decision support system for

- managing oil spill events. *Environmental Management*, 32(2), 290–298.
<https://doi.org/10.1007/s00267-003-2969-7>
- Kishawy, H. A., & Gabbar, H. A. (2010). International Journal of Pressure Vessels and Piping Review of pipeline integrity management practices. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 87(7), 373–380.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2010.04.003>
- Larochelle, H., Bengio, Y., Louradour, J., & Lamblin, P. (2009). Exploring Strategies for Training Deep Neural Networks. *Journal of Machine Learning Research*, 1, 1–40.
[https://doi.org/Doi 10.1109/Tsmcc.2012.2220963](https://doi.org/Doi%2010.1109/Tsmcc.2012.2220963)
- Leifer, I., Lehr, W. J., Simecek-Beatty, D., Bradley, E., Clark, R., Dennison, P., ... Wozencraft, J. (2012). State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill. *Remote Sensing of Environment*, 124, 185–209. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.024>
- Lioliou, D., & Ramirez, P. (2016). Drones Help Detect Corrosion under Insulation. *Materials Performance*. <https://doi.org/10.1109/CDC.2016.7799263>
- Liu, J., Wang, H., & Yuan, Z. (2012). Forecast model for inner corrosion rate of oil pipeline based on PSO-SVM. *Int. J. Simulation and Process Modelling*, 7(1/2), 74–80.
- Lopes, R. L., Nikhalat-Jahromi, H., & Jorge, A. M. (2016). An Overview of Evolutionary Computing for Interpretation in the Oil and Gas Industry. In *Proceedings of the Ninth International C* Conference on Computer Science & Software Engineering - C3S2E '16*. <https://doi.org/10.1145/2948992.2949006>
- López, D. A., Schreiner, W. H., de Sánchez, S. R. R., & Simison, S. . N. (2003). The influence of carbon steel microstructure on corrosion layers. *Applied Surface Science*. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)01218-7](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)01218-7)
- Mackay, B., Jackson, J. E., Melot, D., Scheie, J., & Vittonato, J. (2016). La corrosión : La lucha más extensa. *Oilfield Review* 28.
- Martínez Rodrigo, M. D., Museros Romero, P., Poy Gil, A., & Romero García, M. L. (2013). *Resistencia de materiales. Resistencia de materiales*. <https://doi.org/10.6035/infitec.2002.12>
- Marušić, K., Kekez, K., & Martinez, S. (2019). Comparison of soil properties measurements in pipeline corrosion estimation. *Materials and Corrosion*.

<https://doi.org/10.1002/maco.201810768>

- Mayring, P. (2015). Qualitative Content Analysis: Theoretical Background and Procedures. In *Approaches to Qualitative Research in Mathematics Education*. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9181-6_13
- Mecanz. (2016). *Reporte de Estudio de pH y Resistividad del suelo de manera longitudinal en el trazo del DDV Realizado al Oleoducto 24 " Ø . Nuevo Teapa – Tula PXR-OP-SCC-SUD-GCM-L-13-14*. Mendoza.
- Mesquita, T. J., Chauveau, E., Mantel, M., Bouvier, N., & Koschel, D. (2014). Corrosion and metallurgical investigation of two supermartensitic stainless steels for oil and gas environments. *Corrosion Science*. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.12.015>
- Migahed, M. A., Abd-el-raouf, M., Al-sabagh, A. M., & Abd-el-bary, H. M. (2005). Effectiveness of some non ionic surfactants as corrosion inhibitors for carbon steel pipelines in oil fields, *50*, 4683–4689. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.02.021>
- Minitab. (2017). Interpret the key results for One-Way ANOVA.
- Mitutoyo. (2003). Rugosimetro SJ-201.
- Mohaghegh, S. D., Al-Fattah, S. M., & Popa, A. S. (2011). *Artificial Intelligence & Data Mining Applications in the E&P Industry. Getting Up to Speed*.
- Mohamed, A., & Hamdi, M. S. (2017). Using Computational Intelligence for the Safety Assessment of Oil and Gas Pipelines : A Survey, 189–207. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53474-9>
- Mohanty, R. P., & Deshmukh, S. G. (1997). Evolution of a decision support system for human resource planning in a petroleum company. *International Journal of Production Economics*, *51*(3), 11.
- NACE Standard. (2013). *SP0169 - Standard Practice Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems. Sp0169-2013*.
- Nicola, S., Carreto, V., Mentzer, R. A., & Mannan, M. S. (2013). Corrosion Under Insulation Detection Technique. In *Corrosion 2013*.
- OPEC. (2018a). *OPEC Annual Statistical Bulletin 2018*. Retrieved from https://www.opec.org/opec_web/en/
- OPEC. (2018b). OPEC crude oil price statistics annually 1960-2018 | Statistic.
- OPEC. (2020). *Monthly Oil Market Report - OPEC*. www.opec.org (Vol. 3).

<https://doi.org/10.1366/000370205775142601>

- Ortea, E. (2010). *Ensayos de dureza. Ceramics International*.
- Ossai, C. I. (2013). Pipeline corrosion prediction and reliability analysis : A systematic approach with Monte Carlo Simulation and Degradation models. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2(3), 58–69. <https://doi.org/ISSN 2277-8616>
- Patchigolla, K., & Oakey, J. E. (2013). Design Overview of High Pressure Dense Phase CO2 Pipeline Transport in Flow Mode. *Energy Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.198>
- Pemex. (2016a). Informe de sustentabilidad 2016. *Informe de Sustentabilidad*. Retrieved from www.pemex.com/acerca/informes_publicaciones/.../Informe.../Informe_anual_2016.pdf
- Pemex. (2016b). Sistema de Confiabilidad Operacional. Cd de México.
- Pemex. (2017a). Normas de referencia vigentes. Retrieved December 3, 2017, from <http://www.pemex.com/procura/procedimientos-de-contratacion/normas-referencia/Paginas/normas-ref-vigentes.aspx>
- Pemex. (2017b). *Resultados del tercer trimestre de 2017*. Cd. de México, México.
- Pemex. (2020). *FILOSOFÍA OPERATIVA DEL OLEODUCTO NUEVO TEAPA - VENTA DE CARPIO - TULA - SALAMANCA 24" 30"*.
- PEMEX. (2007). NRF-047-PEMEX-2007 Diseño, Instalación Y Mantenimiento De Los Sistemas De Protección Catódica. *COMITÉ DE NORMALIZACIÓN DE PETRÓLEOS MEXICANOS Y ORGANISMOS SUBSIDIARIOS*.
- Peng, X., Zhang, P., & Chen, L. (2009). Long-Distance Oil/Gas Pipeline Failure Rate Prediction Based on Fuzzy Neural Network Model. *2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*, 651–655. <https://doi.org/10.1109/CSIE.2009.738>
- Petroleos Mexicanos. (2020). *Robo de Hidrocarburos en México Enero - Septiembre del 2019*.
- Philip Kotler/ Gary Armstrong. (2012). Marketing. *Marketing*.
- Pots, B. F., & Kapusta, S. D. (2005). Prediction of Corrosion Rates of the Main Corrosion Mechanisms in Upstream Applications. In *Corrosion 2005*.

- Puig, V., Quevedo, J., Escobet, T., Morcego, B., & Ocampo, C. (2004a). Control Tolerante a Fallos (parte I): Fundamentos y Diagnóstico de Fallos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*.
- Puig, V., Quevedo, J., Escobet, T., Morcego, B., & Ocampo, C. (2004b). Control tolerante a fallos (parte II): Mecanismos de tolerancia y sistema supervisor. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*.
<https://doi.org/10.4995/riai.v1i2.10608>
- Química Apollo. (2017). Productos y servicios - Ductos.
- Rammy, M. H., & Al-Nuaim, S. (2015). Flow Regime Prediction Using Fuzzy Logic and Modification in Beggs and Brill Multiphase Correlation. *Flow Regime Prediction Using Fuzzy Logic and Modification in Beggs and Brill Multiphase Correlation*.
<https://doi.org/10.2523/IPTC-18267-MS>
- Schipor, O., Geman, O., Chiuchisan, I., & Covasa, M. (2016). From fuzzy expert system to artificial neural network: application to assisted speech therapy. *Artificial Neural Networks - Models and Applications*, 165–193. <https://doi.org/10.5772/63332>
- Schocken, S., & Ariav, G. (1994). Neural networks for decision support: Problems and opportunities. *Decision Support Systems*, 11(5), 393–414. [https://doi.org/10.1016/0167-9236\(94\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0167-9236(94)90015-9)
- Shabarchin, O., & Tesfamariam, S. (2016). Internal corrosion hazard assessment of oil & gas pipelines using Bayesian belief network model. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.02.001>
- Shabarchin, O., & Tesfamariam, S. (2017). Risk assessment of oil and gas pipelines with consideration of induced seismicity and internal corrosion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.03.002>
- Shafeek, H. I., Gadelmawla, E. S., Abdel-shafy, A. A., & Elewa, I. M. (2004). Automatic inspection of gas pipeline welding defects using an expert vision system, 37, 301–307. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2003.10.004>
- Shen, L., & Stopher, P. R. (2014). Review of GPS Travel Survey and GPS Data-Processing Methods. *Transport Reviews*. <https://doi.org/10.1080/01441647.2014.903530>
- Sheremetov, L. B., Contreras, M., & Valencia, C. (2004). Intelligent multi-agent support for the contingency management system. *Expert Systems with Applications*, 26, 57–71.

[https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(03\)00107-6](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(03)00107-6)

- Sheremetov, L., Batyrshin, I., Filatov, D., Martinez, J., & Rodriguez, H. (2006). Fuzzy expert system for solving lost circulation problem. *Applied Soft Computing Journal*, 8(1), 14–29. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2006.11.003>
- Shukla, A., & Karki, H. (2016). Application of robotics in onshore oil and gas industry-A review Part i. *Robotics and Autonomous Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.09.012>
- Supriyatman, D., Sumarni, Sidarto, K. A., & Suratman, R. (2012a). Artificial neural networks for corrosion rate prediction in gas pipelines. *Society of Petroleum Engineers - SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition 2012, APOGCE 2012*, 1(May), 2012.
- Supriyatman, D., Sumarni, Sidarto, K. A., & Suratman, R. (2012). Artificial neural networks for corrosion rate prediction in gas pipelines. In *Society of Petroleum Engineers - SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition 2012, APOGCE 2012*. <https://doi.org/10.29118/ipa.0.12.e.148>
- Supriyatman, D., Sumarni, Sidarto, K. A., & Suratman, R. (2012b). Artificial neural networks for corrosion rate prediction in gas pipelines. *Society of Petroleum Engineers - SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition 2012, APOGCE 2012*.
- Taleb-Berrouane, M., Khan, F., Hawboldt, K., Eckert, R., & Skovhus, T. L. (2018). Model for microbiologically influenced corrosion potential assessment for the oil and gas industry. *Corrosion Engineering Science and Technology*. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2018.1483221>
- Tasdemir, S., Saritas, I., Ciniviz, M., & Allahverdi, N. (2011). Artificial neural network and fuzzy expert system comparison for prediction of performance and emission parameters on a gasoline engine. *Expert Systems with Applications*, 38(11), 13912–13923. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.198>
- Tranfield, D. C., Denyer, D. C., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for Evidence-Based Management by D Tranfield D Denyer and P Smart 2003. *British Academy of Management*.
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>

- Turnbull, A., Slavcheva, E., & Shone, B. (1998). Factors Controlling Naphthenic Acid Corrosion. *Corrosion*. <https://doi.org/10.5006/1.3284811>
- Urbina, A. G., & Aoyama, A. (2017). Pipeline Risk Assessment Using Artificial Intelligence: A Case from the Colombian Oil Network, *00(00)*, 1–7. <https://doi.org/10.1002/prs>
- Weatherford. (2006). *Reporte final UHR. Wetlands*. Sector Mendoza, Pemex Logistica.
- Weatherford. (2011). *Inspección Interna con Equipo de Ultrasonido de Haz Recto. Reporte final Sección Cd. Mendoza – Maltrata*. Cd. de México, México.
- Weckman, G., Young, W., Hernández, S., Rangwala, M., & Ghai, V. (2010). Extracting knowledge from carbon dioxide corrosion inhibition with artificial neural networks. *International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice*, *17(1)*, 69–79.
- Wee, B. Van, & Banister, D. (2016). How to Write a Literature Review Paper? *Transport Reviews*. <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1065456>
- Yam, R. C. M., Tse, P. W., Li, L., & Tu, P. (2001). Intelligent predictive decision support system for condition-based maintenance. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *17(5)*, 383–391. <https://doi.org/10.1007/s001700170173>
- Zheng, X. fei, Kang, Y. lin, Meng, D. liang, Shou-yong, A. N., & Xia, D. xiu. (2011). Effect of Cooling Start Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of X80 High Deformability Pipeline Steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60020-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60020-X)