

**ANALISIS Y DIAGNOSTICO DE PROBLEMAS EN EL EQUIPO DE SUBSUELO
DE UNIDADES DE BOMBEO MECANICO UTILIZANDO REDES NEURONALES**

**CRISTIAN FERNANDO MATEUS MARIN
DANIEL MAURICIO ROJAS CÁRDENAS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2007

**ANALISIS Y DIAGNOSTICO DE PROBLEMAS EN EL EQUIPO DE SUBSUELO
DE UNIDADES DE BOMBEO MECANICO UTILIZANDO REDES NEURONALES**

**CRISTIAN FERNANDO MATEUS MARIN
DANIEL MAURICIO ROJAS CÁRDENAS**

**Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero de Petróleos.**

Director:

M.Sc. FERNANDO ENRIQUE CALVETE

Co-director:

Ing. ELKIN RODOLFO SANTAFÉ RANGEL

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2007

A Dios, primero y sobre todas las cosas.

A mis Padres Guillermo y Aristely por todo el apoyo incondicional que recibo, por su amor y por ser fuente de mi inspiración.

A mis hermanos Nixon y Nelly, por brindarme su amistad y por acompañarme en todos los momentos de mi vida. Fortaleza y motivación para conseguir mis propósitos. Gracias por aguantar a su hermanito.

A Marialejandra, por brindarme su amistad, amor sincero y apoyarme incondicionalmente. Fuente de mi inspiración, entusiasmo y alegría.

A mi Familia, porque siempre creyeron en mí.

A mi sobrina Sarita, por alegrarme la vida.

Daniel.

A Dios por ser mi guía y darme las fuerzas necesarias para alcanzar todas mis metas y salir adelante en los momentos difíciles de mi vida.

A mis padres Maritza y Eocardo por su amor, respaldo e incondicional apoyo y quienes hicieron posible el alcanzar este objetivo.

A mis hermanas Erika y Lina, por su amistad comprensión y apoyo.

A mi sobrino Juan Felipe porque con su existencia alegra cada uno de los momentos de mi vida.

Cristian.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan agradecimientos a:

A la **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**, por fomentar un ambiente propicio para la investigación y el desarrollo de aplicaciones útiles a la sociedad.

A los profesores **FERNANDO ENRIQUE CALVETE** y **ELKIN RODOLFO SANTAFE RANGEL**, Director y Co-director del proyecto, por su colaboración, orientación y consejos para el desarrollo del presente trabajo.

Al **GITAH**, por su apoyo y aporte en el desarrollo de este trabajo

Cristian.

A Juliana, por su apoyo, por estar siempre conmigo, y por brindarme tantos momentos felices.

A Tavo, Carlos, Ivan y Melba, por brindarme su amistad incondicional, apoyarme en mis proyectos y corregirme cuando estaba equivocado.

A mis amigos de la universidad, Paola, Nico, Adriana, Yuli, Yorguin, Tantan, Oscar, Jaime, Jair, Cesar, Maoli, Nidia, Yeigmi, Victor, y todos los que estuvieron conmigo en este proceso, siempre estaré dispuesto para lo que necesiten.

Daniel.

A mis Amigos Eliana, Melba, Ximena y Erwin, la vida nos enseña que si las cosas se hacen bien siempre estarás rodeado de buenas personas, gracias.

A mis compadres Nano, Juli, Alex, Cristian, y Albert, mis otros hermanos por creer en mi y proporcionarme su amistad y alegría.

A todos aquellos que durante mi carrera pusieron su grano de arena para la consecución de este título.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
1. GENERALIDADES SOBRE EL BOMBEO MECANICO	19
1.1 COMPONENTES DEL SISTEMA DE BOMBEO MECANICO	19
1.1.1 Equipo de superficie	20
1.1.2 Equipo de fondo	22
1.2 UNIDADES DE BOMBEO	23
1.2.1 Geometría de las Unidades de Bombeo.	24
1.2.2 Nomenclatura API de la Unidad de bombeo	26
1.3 BOMBAS DE SUBSUELO	27
1.3.1 Tipos de Bombas	31
1.3.2 Nomenclatura API para las bombas de subsuelo	40
1.4 SARTA DE VARILLAS	42
1.4.1 Tipo de varillas y acoples	43
1.5 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL EQUIPO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO MECANICO	45
2. DINAGRAMA	49
2.1 TIPOS DE DINAGRAMA	50
2.1.1 Dinagrama de superficie.	50
2.1.2 Dinagrama de fondo	51
2.2 INTERPRETACION DE DINAGRAMAS	53
2.2.1 Proceso para identificar las partes de un “Downhole card” y sus problemas	54
2.3 DINAGRAMAS DE LOS PROBLEMAS MAS REPRESENTATIVOS.	56
2.3.1 Buen llenado de bomba con tubería anclada.	56
2.3.3 Golpe de fluido.	58
2.3.4 Bloqueo por gas.	59
2.3.5 Mal funcionamiento de la válvula viajera.	59

2.3.6 Mal funcionamiento de la válvula fija.	60
2.3.7 Mal funcionamiento de ambas válvulas	61
3. REDES NEURONALES ARTIFICIALES.	63
3.1 QUE ES UNA RED NEURONAL ARTIFICIAL:	63
3.1.1 Funcionamiento de una neurona biológica	65
3.2 CARACTERÍSTICAS DE UNA RED NEURONAL ARTIFICIAL	67
3.2.1 Conexiones y funcionamiento de una neurona	70
3.2.2 Funciones de transferencia	71
3.3 MODELO PERCEPTRÓN	74
3.3.1 Perceptrón simple	74
3.3.2 Perceptron multicapa.	77
3.4 BACK PROPAGATION NETWORK	79
3.4.1 Aplicaciones de Backpropagation	82
3.5 APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES A LA INGENIERIA DE PETROLEOS:	83
4. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACION DE PROBLEMAS EN EL EQUIPO DE SUBSUELO POR MEDIO DE REDES NEURONALES.	87
4.1 PROYECTO NEUROCOMPUTACIONAL.	88
4.1.1 Fases de un proyecto Neurocomputacional	88
4.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO	93
4.2.1 Etapa 1.	95
4.2.2 Etapa 2	97
4.2.3 Etapa 3	112
4.2.4 Etapa 4	119
5. APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES EN LA DETERMINACION DE PROBLEMAS EN EL EQUIPO DE SUBSUELO DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO MECÁNICO	121
5.1 PATRONES DE ENTRENAMIENTO	122
5.3 PRE-PROCESAMIENTO DE DATOS.	129
5.4 ENTRENAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE LA RED.	130

5.4.1 Primera etapa	130
5.4.2 Segunda etapa	135
5.5 APLICACIÓN AL CAMPO-ESCUELA COLORADO.	147
5.5.1 Generalidades	147
5.5.2 Problemas Relacionados Con La Producción Del Campo Colorado	149
5.5.3 Principales Problemas presentados en el equipo de subsuelo de las unidades de bombeo mecánico en Colorado	151
5.5.4 Topología de la red	153
5.5.5 Dinagramas de entrenamiento, prueba y predicción.	154
5.5.6 Entrenamiento y Optimización	167
5.5.7 Predicción y Análisis de resultados	172
CONCLUSIONES	178
RECOMENDACIONES	181
BIBLIOGRAFÍA	183
ANEXOS	187

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Unidad convencional	22
Figura 2. Bomba de subsuelo	23
Figura 3. Unidad de bombeo balanceada por aire.	25
Figura 4. Unidad de bombeo Mark II	26
Figura 5. Ciclo de Bombeo.	30
Figura 6. Sección transversal Bomba de Tubería.	32
Figura 7. Sección transversal Bomba RHA	34
Figura 8. Sección transversal de una bomba de varillas Ancla Inferior y Barril Estacionario.	36
Figura 9. Sección transversal de una bomba RHT	38
Figura 10. Tipos de bombas	40
Figura 11. Ejemplo y descripción de la nomenclatura API de las bombas de subsuelo.	41
Figura 12. Grafica que muestra los dos tipos de dinagramas y las posiciones de donde son construidos	51
Figura 13. Dinagrama de fondo teórico con bomba llena	53
Figura 14. Regiones de un dinagrama.	54
Figura 15. Dinagrama con Buen llenado de Bomba y Tubería Anclada.	57
Figura 16. Dinagrama con Buen llenado de Bomba y Tubería Desanclada	58
Figura 17. Dinagrama de Bomba con Alto Golpe de Fluido.	58
Figura 18. Dinagrama de Bomba Bloqueada por Gas.	59
Figura 19. Dinagrama con Mal Funcionamiento de Válvula Viajera.	60
Figura 20. Dinagrama con Mal Funcionamiento de Válvula Fija.	60
Figura 21. Dinagrama con Mal Funcionamiento de Ambas Válvulas.	61
Figura 22. Dinagrama Típico de un Pozo con Varilla Partida.	62
Figura 23. Esquema estructural de dos neuronas biológicas	66

Figura 24. Elementos principales de una RNA.	68
Figura 25. Similitud entre neurona biológica y artificial	69
Figura 26. Esquema general de una neurona artificial.	70
Figura 27. Función de transferencia Hardlim, con y sin ganancia (b).	72
Figura 28. Función de transferencia Sigmoidal, con y sin ganancia (b).	73
Figura 29. Solución problemas AND y OR.	75
Figura 30. Problema XOR	77
Figura 31. Solución Problema XOR.	78
Figura 32. Esquema general de una RNA multicapa.	80
Figura 33. Ciclo de vida de un proyecto que utiliza Neurocomputación.	89
Figura 34. Metodología de trabajo.	94
Figura 35. Regiones en las que fue dividido el dinagrama	96
Figura 36. Dinagramas sin normalizar	98
Figura 37. Dinagramas normalizados	99
Figura 38. Puntos significativos de un cuadrado y una figura irregular.	101
Figura 39. Dinagrama con puntos por intervalo.	103
Figura 40. Explicación grafica de selección de un punto significativo	104
Figura 41. Graficas de un dinagrama con todos los puntos y únicamente con los puntos significativos seleccionados.	106
Figura 42. Dinagrama de fondo	102
Figura 43. Matriz que representa un dinagrama de fondo	108
Figura 44. Fusión dinagrama - matriz	108
Figura 45. Matriz referencia con niveles de valores	109
Figura 46. Carta artificial para validar el algoritmo de la extracción del PR	111
Figura 47. Patrones de puntos relevantes y su respectiva dispersión.	112
Figura 48. Esquema de la red entrenada 60:10:9 del presente proyecto.	114
Figura 49. Esquema de la red entrenada 120:10:8 del presente proyecto	115
Figura 50. Esquema de la red entrenada 76:60:9 del presente proyecto.	116
Figura 51. Esquema de la red entrenada 60:12:10:9 del presente proyecto.	117
Figura 52. Esquema de funciones de transferencia sigmoidal y tangsigmoidal.	118

Figura 53. Visualización de resultados Red tipo A1 primer entrenamiento	132
Figura 54. Visualización de resultados finales Red tipo A1	133
Figura 55. Visualización de resultados finales Red tipo A2	134
Figura 56. Visualización de resultados finales Red tipo B1	137
Figura 57. Visualización de resultados finales Red tipo B2	138
Figura 58. Visualización en Menbrain Dinagrama prueba 1.	142
Figura 59. Visualización en Menbrain Dinagrama prueba 2.	143
Figura 60. Visualización en Menbrain Dinagrama prueba 3.	143
Figura 61. Visualización en Menbrain Dinagrama prueba 4.	144
Figura 62. Visualización en Menbrain Dinagrama prueba 5	145
Figura 63. Visualización en Menbrain Dinagrama prueba 6.	145
Figura 64. Visualización en Menbrain Dinagrama prueba 7.	146
Figura 65. Visualización en Menbrain Dinagrama prueba 8.	146
Figura 66. Trabajos de Remoción de Parafina en el Campo Colorado.	150
Figura 67. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.	158
Figura 68. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.	159
Figura 69. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.	160
Figura 70. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.	160
Figura 71. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.	161
Figura 72. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.	162
Figura 73. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.	162
Figura 74. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.	163

Figura 75. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.	164
Figura 76. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.	164
Figura 77. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.	165
Figura 78. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.	166
Figura 79. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.	166
Figura 80. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.	167
Figura 81. Fin de carrera descendente Dinagrama de prueba 2	173
Figura 82. Fin de carrera descendente Dinagrama de prueba 4	173

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de las unidades de bombeo	24
Tabla 2. Propiedades Químicas y Mecánicas de los materiales de una varilla de succión API de acuerdo con la especificación API 11B.	43
Tabla 3. Composición química y dureza de los acoples.	45
Tabla 4. Forma eficiente y deficiente de las regiones de un dinagrama.	55
Tabla 5. Principales funciones de transferencia	73
Tabla 6. Explicación de la hoja de cálculo para selección de puntos significativos.	105
Tabla 7. Patrones de entrenamiento etapa 1.	123
Tabla 8. Patrones elaborados combinados etapa 1.	126
Tabla 9. Patrones de prueba etapa 2.	127
Tabla 10. Resultados fase de prueba de la Red A1	135
Tabla 11. Resultados fase de prueba de la Red A2	135
Tabla 12. Resultados fase de prueba de la Red B1.	139
Tabla 13. Resultados fase de prueba de la Red B2.	139
Tabla 14. Arquitecturas de red evaluadas “sensibilidad de neurona y capas”.	140
Tabla 15. Situaciones comunes en los equipos de subsuelo de las unidades de bombeo mecánico del campo colorado.	151
Tabla 16. Dinagramas utilizados para el entrenamiento de la red neuronal aplicada al Campo Escuela Colorado.	154
Tabla 17. Dinagramas de entrenamiento para la aplicación en el Campo-Escuela Colorado.	155
Tabla 18. Pruebas	169
Tabla 19. Resultados Topología seleccionada	172
Tabla 20. Resultados predicción.	174

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Bombas Especiales.	188
Anexo B. Analizador de pozo (WELL ANALYZER).	194
Anexo C. Entrenamiento de la red	204
Anexo D. Visualización de la arquitectura de la red aplicada al campo-escuela Colorado y de sus resultados sobre la etapa de prueba y predicción.	225
Anexo E. Manual de usuario Pre-procesador de dinagramas Echometer - Membrain	229

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS EN EL EQUIPO DE SUBSUELO DE UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO UTILIZANDO REDES NEURONALES. *

AUTORES: CRISTIAN FERNANDO MATEUS MARIN.**
DANIEL MAURICIO ROJAS CARDENAS.**

PALABRAS CLAVES: Producción, Bombeo Mecánico, Dinagramas, TWM, Sistema de Levantamiento, bomba de subsuelo, Redes Neuronales Artificiales, Inteligencia Artificial.

El Bombeo Mecánico es la técnica mas frecuentemente usada en el levantamiento artificial para la producción de aceite en yacimientos de baja presión. Las cartas de la bomba de fondo son usadas para evaluar el comportamiento de la unidad de bombeo las cuales contienen información significativa que describe el funcionamiento del equipo. La necesidad de identificar los problemas rápidamente y de manera precisa es esencial en el intento de minimizar los costos de operación y maximizar la producción.

Este trabajo presenta una alternativa para la interpretación de dinagramas la cual realiza un análisis no solo cualitativo, si no cuantitativo, y además proporciona agilidad y rapidez en el reconocimiento de problemas en el equipo de subsuelo previniendo daños. El trabajo establece una metodología para construir una red neuronal artificial (RNA) capaz de realizar la interpretación de dinagramas de la forma ya descrita. Se presentan resultados de la interpretación realizada por la RNA a 15 dinagramas del Campo Escuela Colorado. En este estudio se aclara el procedimiento para disponer y extraer las características significativas de cada dinagrama y acomodar la información a la RNA, actividades que se constituyen como tareas de pre-procesamiento de datos para lo cual se diseñó y construyó un software. La RNA construida es tipo perceptrón multicapa con funciones de transferencia sigmoïdal y tan-sigmoïdal; y es entrenada utilizando la técnica "error-back-propagation". La RNA toma un total de 60 puntos como entrada, estos puntos son extraídos directamente del perimetro del registro dinamométrico. Las condiciones problema identificadas por la red son agrupadas en 9 clases distintas. La red es capaz de identificar una o más de estas condiciones problema para cada carta dinamométrica. Los resultados de aplicar esta red neuronal al Campo Escuela Colorado son discutidos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Director de Proyecto Ingeniero de Petróleos M.Sc. Fernando Enrique Calvete Profesor Escuela de Ingeniería de Petróleos, Codirector del Proyecto Ingeniero de Petróleos Elkin Rodolfo Santafe Rangel.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS AND DIAGNOSIS OF DOWNHOLE EQUIPMENT OF SUCKER ROD PUMPING PROBLEMS USING NEURONAL NETWORKS. *

AUTHORS: CRISTIAN FERNANDO MATEUS MARIN. **
DANIEL MAURICIO ROJAS CARDENAS. **

KEYWORDS: Sucker Rod Pumping, Dynamometer Cards, TWM, Lifting System, Artificial Neural Network, Artificial Intelligence, Production.

The Sucker Rod Pumping is the most frequently used artificial-lift technique for oil production in low pressure reservoirs. Down hole pump cards are used to evaluate performance of the pumping unit, these contain significant information describing the behavior of the pump. The need to identify problems quickly and accurately is essential in order to minimize operating costs and maximize production.

This work presents an alternative for the interpretation of dynamometer cards (DC) this tool makes a dual analysis, qualitative and quantitative, in addition it provides agility and fast response in the recognition of problems related with the down hole equipment of sucker rod pumping in order to prevent pump failures. The work establishes a methodology to build and develop an artificial neuronal network (RNA) able to make the interpretation of dynagraphs the way already described. Results of the interpretation made for the RNA on 15 dynamometer cards from "Campo Escuela Colorado". In this study the procedure is clarified to arrange and to extract the characteristics significant of each DC and to accommodate the information to the RNA, those activities are constituted like tasks of data pre-processing for which a software was designed and developed. The developed RNA is type multilayer perceptron with sigmoidal and tan-sigmoidal activation functions; and it is trained using the error-back-propagation technique. The RNA takes a total of 60 points like inputs, these points are collected from the pump card perimeter. Pump problem conditions are grouped into 9 different types. The network is able to identify one or more of these conditions proposing a problem for each DC. The results of applying this neuronal network to the Campo Escuela Colorado are discussed.

* Degree Work

** Faculty of Physical Chemical Engineering, Petroleum Engineering School, Advisers: Eng. M.Sc. Fernando Enrique Calvete, Eng. Elkin Rodolfo Santafe Rangel.

INTRODUCCIÓN

El sistema de bombeo mecánico es un método de levantamiento artificial muy importante, la gran mayoría (Cerca del 80%) de los pozos de crudo del mundo producen por bombeo mecánico. En campo una variedad de problemas mecánicos pueden ocurrir con este sistema, especialmente en el equipo de fondo y por esto es esencial identificar estos problemas de forma acertada y en el menor tiempo posible para minimizar el costo de operación y maximizar la producción.

Para asegurar la operación apropiada de estos sistemas es necesaria una supervisión regular; esto se hace por medio de un dinamómetro, que se ubica en la barra lisa en el equipo de superficie. El Dinagrama es una impresión grafica generada por el dinamómetro, que relaciona la carga contra el desplazamiento del pistón de la bomba, y generalmente se obtiene en superficie (dinamómetro de barra lisa).

La industria petrolera está en el proceso de automatizar el control y monitoreo del bombeo pozos. Las computadoras se están utilizando para supervisar la bomba continuamente y para transmitir datos a una central para el análisis adicional. El volumen de datos y los métodos de análisis e interpretación de forma manual hacen de estos un proceso tedioso, lento y agotador para el ingeniero, por tanto es necesario desarrollar herramientas para el análisis automático y detección de problemas que permita una toma ágil de decisiones como se comentaba anteriormente, y deben ser lo más acertadas y eficientemente posible.

Con base en lo anterior y motivados por los últimos adelantos tecnológicos, las nuevas opciones de procesamiento de datos, entre otras; este trabajo explora la alternativa de utilizar un Software de redes neuronales para la interpretación de Dinagramas.

1. GENERALIDADES SOBRE EL BOMBEO MECANICO

Para producir pozos en los cuales su presión de fondo (BHP) es menor que las pérdidas de presión en el pozo o para incrementar la tasa de producción en pozos con flujo natural se requiere un sistema de levantamiento artificial. El principal método de levantamiento artificial en el mundo es el bombeo mecánico, con aproximadamente el 85 % de los pozos productores.

El diseño del sistema de bombeo mecánico por varillas de succión tiene por objeto transmitir la energía desde la superficie hasta la profundidad en donde se encuentra ubicada la bomba y el fluido, a fin de elevarlo hasta superficie.

La gran limitante para el diseño de este sistema de levantamiento artificial ha sido siempre la profundidad, no obstante con los avances tecnológicos y los nuevos materiales que están surgiendo, se están construyendo unidades de bombeo con mayor capacidad de carga y con varillas de alta resistencia para poder llegar a mayores profundidades.

1.1 COMPONENTES DEL SISTEMA DE BOMBEO MECANICO

El sistema consiste en un ensamblaje del equipo de superficie y de fondo, que eleva el fluido de la formación a superficie por la acción recíproca de una unidad de bombeo en superficie, que levanta y baja la sarta de varillas para accionar la bomba de fondo.

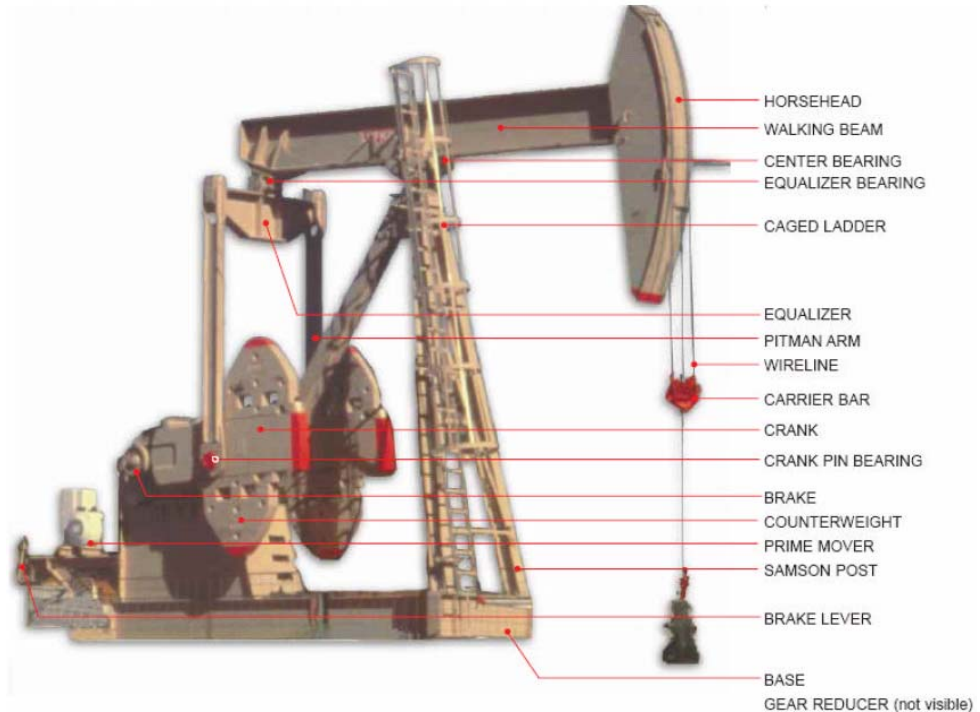
Los componentes individuales de un Sistema de Bombeo Mecánico se pueden dividir en dos grupos principales: el Equipo de superficie y el Equipo de fondo

1.1.1 Equipo de superficie. Este equipo se encuentra a simple vista en la superficie del terreno, y es el encargado de convertir el movimiento rotacional del motor disminuido mediante el reductor de velocidades, en un movimiento recíprocamente lineal vertical y soporta las cargas presentadas durante el ciclo completo de bombeo. El movimiento se transmite a la sarta de varillas la que a su vez hace trabajar a la bomba de subsuelo. El equipo de superficie consta de:

- **Motor:** Puede ser eléctrico o de combustión interna, su función es imprimir movimiento a la unidad de bombeo. Su requerimiento de potencia dependerá de la profundidad y de otras características propias del pozo
- **Estructura:** Comprende la Base de la Unidad, el Poste Maestro y el Balancín.
- **Caja Reductora:** Su función es reducir la alta velocidad y bajo torque del motor a las revoluciones de trabajo y alto torque de la Unidad de Bombeo.
- **Guaya:** Sirve para unir el Cabezal con la Barra Lisa
- **Contrapesas:** sirven para balancear o contrarrestar el peso de las varillas más la columna de líquido.
- **Crank:** Recibe el movimiento rotatorio del eje de baja velocidad de la Caja Reductora.
- **Brazos o Bielas:** Transmiten el movimiento del Crank hacia la Barra Escualizadora.
- **Cojinetes:** (Central y Lateral), el primero transmite el movimiento entre el Poste Maestro y el Balancín y el segundo transmite el movimiento entre el Balancín y las Bielas a través de la Barra Escualizadora.

- **Cabezal:** Ubicado en uno de los extremos del balancín y mantiene la barra lisa verticalmente por medio de su curvatura que es un segmento de un círculo.
- **Águila:** Es un bloque de hierro que va unido a la guaya y de donde cuelga la barra lisa.
- **Freno:** Sirve para posicionar el balancín en un punto deseado después de quitar el movimiento que le imprime el motor a la Unidad de Bombeo.
- **Barra Lisa:** Se conecta siempre con la parte superior de sarta de varillas y consiste en una barra pulida, la cual hace sello con los empaques de la caja de empaques para que no ocurran escapes de crudo.
- **Caja de Empaques:** Es una conexión que se emboca en la T de Producción y sirve para evitar escapes de crudo por el movimiento ascendente y descendente de la Barra Lisa.
- **T de Producción:** Une la sarta del Tubing, la Caja de Empaques y la Línea de Flujo por donde viaja el crudo hacia la batería de producción.

Figura 1. Unidad convencional



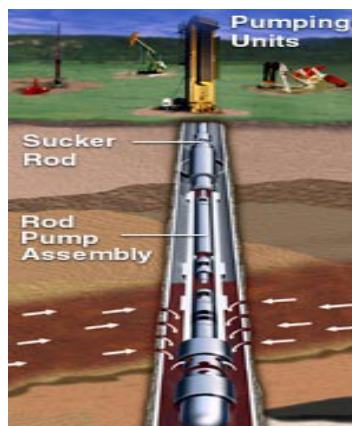
Fuente: Lufkin, Artificial Lift Nomenclature and application formulas

1.1.2 Equipo de fondo. Conformar la parte esencial de este sistema, está limitado por el diámetro de la tubería de revestimiento, y esto puede representar problemas en su diseño. Transmite la energía necesaria para levantar fluido del pozo, sirviendo como elemento conector entre la cara del pozo y la unidad de superficie. Sin este equipo sería imposible la extracción del fluido de un yacimiento, cuya energía no es la suficiente para producir por flujo natural. El equipo de fondo consta de las siguientes partes:

- **Varillas de bombeo:** La sarta de varillas es usada para transmitir el movimiento y la potencia de la unidad de bombeo a la bomba de subsuelo, son fabricadas en acero y fibra de vidrio y las combinadas que conservan la propiedad del material de fabricación. La industria clasifica las varillas de acero en grados C, D, E y K dependiendo de la resistencia a la carga.

- **Tubería de Producción:** Es el medio para transportar el fluido a la superficie y para soportarlo mientras la bomba baja a recoger otra carga. En la mayoría de las instalaciones de bombeo, cuando la profundidad de la bomba no excede los 5000 pies, la tubería es suspendida desde superficie por el cabezal de la tubería. A profundidades mayores, la tubería debe anclarse.
- **Bomba de Subsuelo:** Es la encargada de permitir la entrada de fluido de la formación a la tubería de producción y le proporciona la energía necesaria para levantarlo hasta superficie. Las bombas de subsuelo usadas en el bombeo mecánico trabajan sobre el principio del desplazamiento positivo y son del tipo cilindro-pistón. Sus partes básicas son el barril de trabajo, el pistón y las dos válvulas de bola.

Figura 2. Bomba de subsuelo



Fuente: M.Sc. PÁEZ CAPACHO, Ruth. Curso de Sistemas de levantamiento artificial y facilidades de superficie.

1.2 UNIDADES DE BOMBEO

La función de la unidad de bombeo es convertir el movimiento rotacional del prime mover al movimiento ascendente descendente de la barra pulida. Una unidad de bombeo apropiadamente diseñada tiene el tamaño exacto de caja de engranaje y

estructura. También tiene suficiente capacidad de carrera para producir el fluido que se desea.

1.2.1 Geometría de las Unidades de Bombeo. Las unidades de bombeo generalmente usadas se clasifican según su punto de apoyo y el mecanismo de contrabalance como se muestra en la siguiente Tabla.

Tabla 1. Clasificación de las unidades de bombeo

TIPO DE UNIDAD	CLASE	PUNTO DE APOYO	MECANISMO DE CONTRABALANCE
Convencional	I	Punto medio del balancín	Por contrapeso
Neumáticas	II	Extremo delantero del balancín	Por cilindro de aire
Mark II	II	Extremo trasero del balancín	Por contrapeso

Fuente: Autores del proyecto

Existen también otros varios tipos de unidad tales como las de bajo perfil, hidráulicas, de carreras largas (tales como Rotaflex), y otras unidades de geometría inusual. Sin embargo, la mayoría de los pozos son bombeados con los tres principales tipos de unidades mencionados.

Unidad de bombeo convencional.

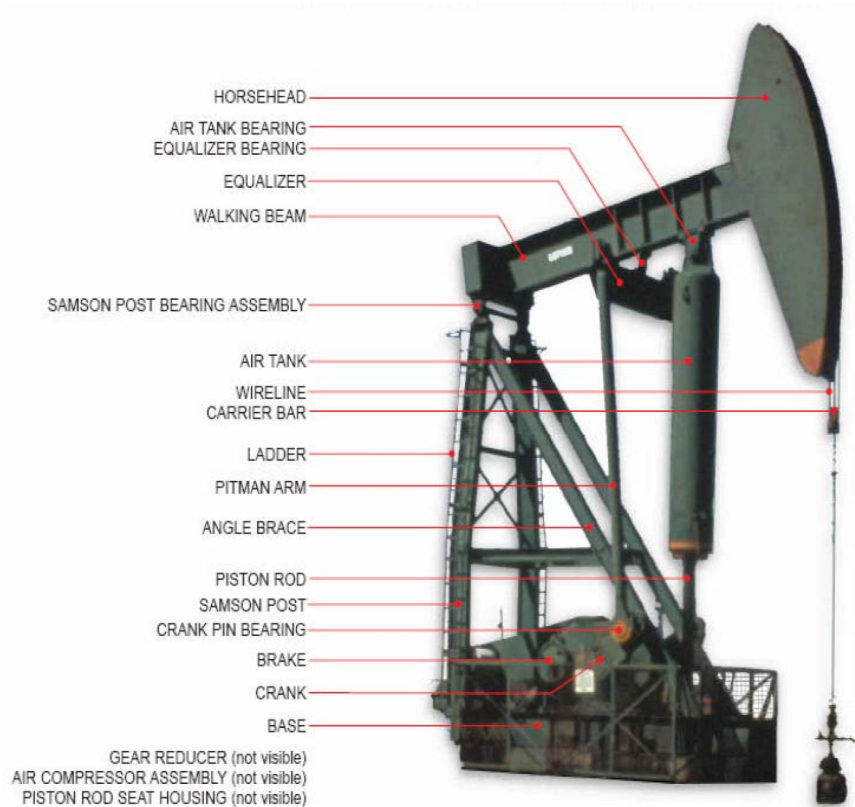
La unidad convencional balanceada por manivelas es la más conocida y popular utilizada en los campos petroleros, de fácil manejo y mantenimiento mínimo. En este tipo de balancín la rotación de las manivelas origina que la viga principal oscile y mueva hacia arriba y hacia abajo al vástago pulido. Un limitante para este tipo de unidades es que su tamaño aumenta notablemente en función de la producción a extraer. Ver Figura 1.

Unidad de bombeo Balanceada por aire

Estas unidades usan aire comprimido en lugar de pesas, lo cual permite controlar mejor el contrapeso; el peso de la unidad se reduce aproximadamente 40% y los costos de transporte e instalación disminuyen considerablemente.

Estas unidades usan aire comprimido en lugar de pesas, tiene la ventaja, de ser mas compacta y menos pesada que las otras geometrías, también se presta para recorridos largos con diseños especiales; la unidad se balancea con cambios de presión del cilindro de aire, se puede proveer mucho contrabalanceo con relativamente pequeños aumentos de presión.

Figura 3. Unidad de bombeo balanceada por aire.

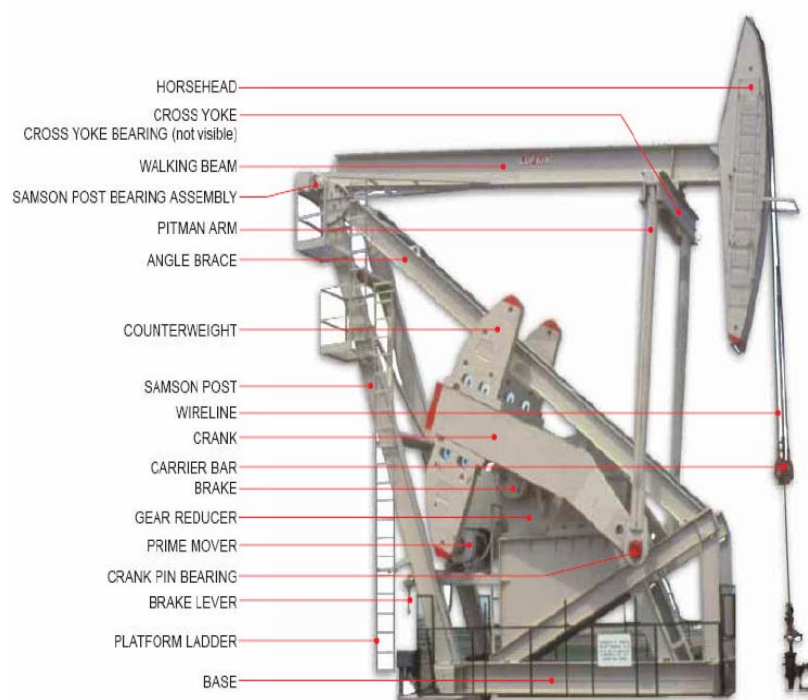


Fuente: Lufkin, Artificial Lift Nomenclature and application formulas

Unidad de bombeo Mark II

Por su singular forma y contrapeso, este tipo de unidad reduce los picos de torsión y en muchos casos, cuando se usa debidamente requiere menos caballaje. La forma poco común del Mark II redonda en una carrera ascendente más rápida a aceleración baja, donde la carga es más alta, lo cual resulta en menores cargas máximas y en más duración de las varillas de bombeo.

Figura 4. Unidad de bombeo Mark II

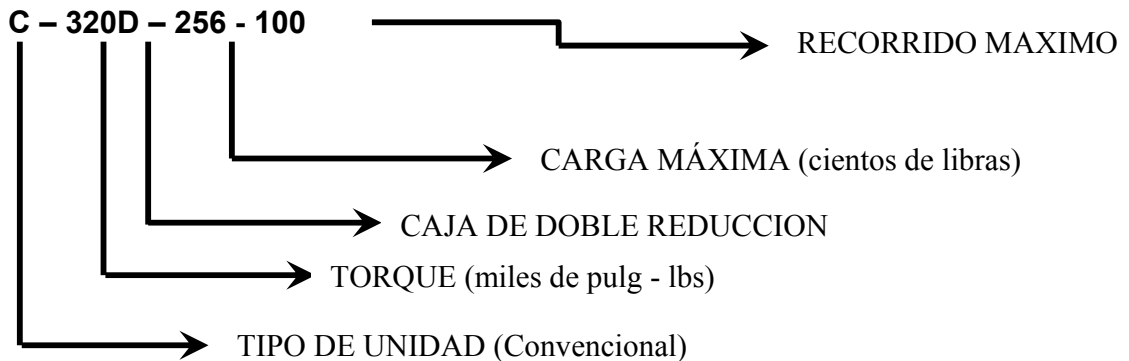


Fuente: Lufkin, Artificial Lift Nomenclature and a pplication formulas

1.2.2 Nomenclatura API de la Unidad de bombeo. La API ha desarrollado un método estándar para describir las unidades de bombeo. Es como sigue:

- Tipo:
 - C.** si es una unidad convencional.
 - B.** si su contrapeso está en el balancín.
 - A.** sí es una unidad balanceada por aire.
 - M** si es una unidad Mark II

- El máximo torque de diseño en el reductor en miles de pulg-lbs. Se adiciona una letra D si el reductor tiene doble reducción.
- La máxima carga de diseño estructural en cientos de libras.
- El máximo recorrido que suministra la unidad.



1.3 BOMBAS DE SUBSUELO

La bomba de subsuelo debe considerarse como el corazón de una instalación de bombeo, porque sin una bomba que funcione correctamente, se puede obtener muy poca o ninguna producción en pozos con baja presión de fondo.

La función de la bomba de subsuelo es levantar fluido desde el nivel del pozo hasta la superficie e impulsarlo por la línea de flujo hasta el punto de recolección, como ya se había señalado anteriormente. Estas bombas trabajan sobre el principio del desplazamiento positivo tipo cilindro – pistón y sus partes básicas son:

- Barril de Trabajo (cilindro)
- Émbolo (pistón)
- Dos Válvulas de bola (la válvula viajera y la válvula fija)
- Anclaje de fondo o Zapata (mecanismo de sello)

La válvula que viene agarrada al Barril de Trabajo actúa como una válvula de Succión y se denomina válvula Fija. La otra válvula, contenida en el émbolo, actúa como una válvula de descarga y se llama válvula Viajera. Dichas válvulas operan como válvulas cheque y sus movimientos de apertura y cierre, durante el movimiento alterno del émbolo.

Barril: Existen diferentes tipos de barriles para bombas de subsuelo, estos pueden ser estacionarios o móviles, de paredes delgadas para pozos someros a medianamente profundos o paredes gruesas para mayores profundidades, con anclaje de fondo o anclaje superficial, barriles tipo cámara (tubing) o tipo camisa (liner).

Pistón: Los pistones para bombas de subsuelo pueden ser de acuerdo a su configuración lisos, de copa, de sucesión de anillos, estriados, etc. Y de acuerdo al material se clasifican en metálicos y no metálicos. Algunas características importantes son: Los pistones metálicos son de redondez precisa en la superficie exterior y pueden ser de acero, cromo o níquel plateado y metal pulverizado (aleación de boro, cromo y silicio). Estos últimos son recomendados para condiciones abrasivas pero donde no existan problemas de ácido sulfúrico. Los pistones de copa comúnmente se utilizan en barriles con bombas de tubería de producción. Comúnmente se fabrican las copas de lona impregnada de brea, caucho o plástico. La aplicación de estos pistones está restringida a poca profundidad y han ido desapareciendo del mercado.

Los pistones de composición de anillos consisten en un número grande de anillos de tela y caucho en ranuras individuales cortadas en un mandril de metal. Tampoco son muy recomendables a menos que sea para poca profundidad.

Válvulas: Las válvulas en una bomba de subsuelo son partes críticas; cada válvula debe operar con cada carrera de la bomba, alternadamente, así la válvula

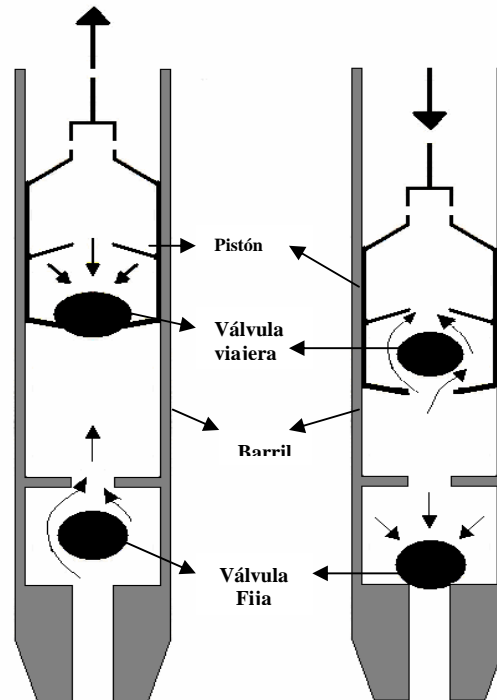
fija permite el llenado del barril y la válvula viajera la descarga del fluido, abriendo con la restricción mínima de fluido y cerrando para no permitir pérdidas. Fallas en las válvulas son la causa más común de fallas en las bombas. La clasificación 11AX del API para válvulas de bola y asiento no especifica los materiales de manufactura, sin embargo, solo la bola y el asiento son hechos como un par, y la bola y asiento de una válvula no debe ser intercambiada con la bola y asiento de otra válvula.

Para prematuro desgaste de válvulas en pozos con problemas de arena se recomienda utilizar válvulas y asientos de mayor dureza como son los de carburo de tungsteno o también un doble juego de válvulas y de esta manera aunque se deposite arena en una de las válvulas, el cierre será asumido por la otra, evitando una violenta descarga de fluido a través de la primera incrementando la vida útil de la bomba.

Anclaje de fondo: Otro elemento que puede considerarse como parte constitutiva adicional de las bombas de subsuelo es el anclaje de fondo. Su función es anclar y sellar la bomba a la tubería de producción y puede ser del tipo copas y del tipo mecánico. El primero utiliza plástico o un material similar para que funcione como sello y el segundo se utiliza para 33 condiciones extremas de temperatura donde el de copas no es recomendable.

Funcionamiento: En la Figura 5 se muestra el periodo básico de operación de la bomba.

Figura 5. Ciclo de Bombeo.



Fuente: Autores del proyecto

El barril está conectado al extremo inferior de la sarta de tubería de producción, mientras que el pistón se mueve directamente por la sarta de varillas. Por fines de simplicidad en la descripción, se asume el bombeo de un fluido incompresible (líquido).

Al comenzar el recorrido ascendente, después de que el pistón ha alcanzado su posición más baja, la válvula viajera se cierra debido a la alta presión hidrostática en la tubería que se encuentra encima de ésta. El líquido contenido en la tubería encima de la válvula viajera es levantado hasta la superficie durante el movimiento ascendente del pistón. Al mismo tiempo, la presión cae en el espacio que existe entre la válvula fija y la viajera, haciendo que se abra la válvula fija. La presión en la cara del pozo hace que el líquido de la formación, a través de la válvula fija llegue hasta el barril, por debajo del pistón. El levantamiento de la columna de

líquido y el llenado del barril con el líquido de la formación continúa hasta finalizar el recorrido ascendente completo, el peso total de la columna de líquido en la sarta de tubería de producción es soportado por el pistón y la sarta de varillas conectada a éste. La elevada fuerza de empuje hace que la sarta de varillas se estire gracias a su elasticidad.

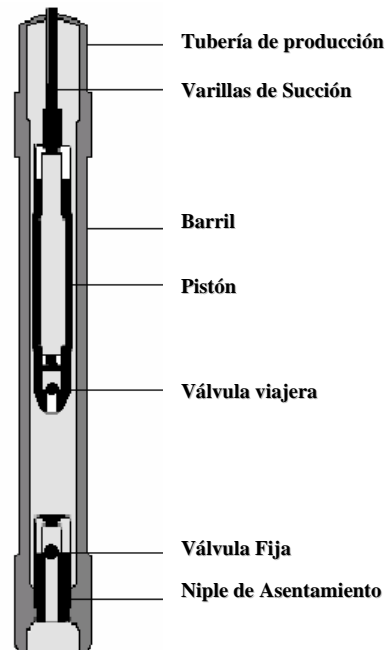
Después que el pistón ha alcanzado su recorrido máximo, la sarta de varillas comienza a bajar. Se inicia el recorrido descendente, la válvula viajera inmediatamente se abre y la válvula fija se cierra. Esta operación de las válvulas se debe a la incompresibilidad del líquido contenido en el barril. Cuando la válvula viajera se abre, el peso del líquido es transferido desde el pistón hasta la válvula fija, originando el estiramiento de la sarta de tubería de producción. Durante el recorrido descendente, el émbolo hace su descenso con la válvula viajera abierta dentro del barril con líquido de formación. Al final del recorrido descendente, la dirección del movimiento de la sarta de varillas se invierte y comienza otro ciclo de bombeo. Nuevamente, el peso del líquido es transferido al émbolo, originando el estiramiento de las varillas y el retorno de la tubería hasta su estado de no estiramiento.

1.3.1 Tipos de Bombas. Las dos principales categorías de bombas de subsuelo son tipo tubería (*tubing pumps*) y de tipo insertos ó varillas (*insert pumps*) que se especifican en la norma API 11AX, su diferencia radica en la forma cómo esta instalado el barril de trabajo en el pozo. Otros tipos de bombas desarrollados posteriormente y conocidos como diseños especiales pueden ser consultado en el Anexo A.

Bomba de Tubería: Las bombas de tubería representan el tipo más antiguo de bombas de succión y tienen una construcción muy simple. Su ventaja inherente sobre los otros tipos de bombas, es su relativamente mayor capacidad de bombeo ya que tienen un barril más grande. Una representación esquemática de una

Bomba de tubería se aprecia en la figura No 6. La figura presenta una bomba con un pistón metálico diseñado por el API con el Código TH: la misma bomba, pero con un pistón flexible está codificado con TP.

Figura 6. Sección transversal Bomba de Tubería.



Fuente: Autores del proyecto

Ventajas:

- Bombas mucho más grande en una tubería dada, con diámetros internos el barril de $\frac{1}{4}$ de pulgada más pequeños que el diámetro interno de la tubería. Estos barriles permiten un mayor volumen de fluido que cualquier otro tipo de bomba.
- Tiene una construcción mucho más fuerte. El barril es una parte integral de la tubería y así, puede soportar grandes cargas. La sarta de varillas esta directamente conectada al pistón, haciendo que la conexión sea más confiable que en las bombas de varilla.

- Las bombas de tubería de producción usualmente son menos costosas que las bombas de varillas ya que tienen menos partes.
- Los mayores tamaños de las válvulas permiten menos pérdidas de presión en la bomba, así que también es posible la producción de fluidos viscosos.

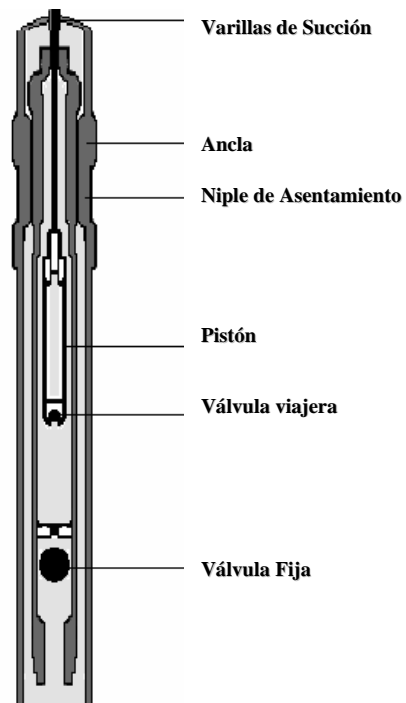
Desventajas:

- Las operaciones de limpieza de un pozo usualmente requieren que la tubería sea retirada; los altos costos de reparación de la bomba son los mayores inconvenientes de las bombas de tuberías de producción.
- Las bombas de tubería de producción funcionan muy deficientemente en pozos gasíferos. El espacio muerto relativamente grande (el espacio entre la válvula fija y la válvula viajera al final del recorrido), ocasiona una pobre acción de la válvula y una baja eficiencia de la bomba.
- La profundidad de levantamiento puede verse limitada por las grandes cargas de fluido asociadas con las mayores áreas del pistón y se podría requerir el empleo de varillas de succión de alta resistencia. A mayores profundidades, se espera que se presente una excesiva pérdida de recorrido del pistón dado los mayores estiramientos de la tubería y la varilla.

Bombas de Varillas con ancla superior y barril estacionario: La figura 7 muestra la sección transversal de una bomba RHA durante el recorrido ascendente. Su barril de trabajo se mantiene en su lugar, en la parte superior del conjunto de la bomba, una posición de asentamiento preferida en la mayoría de las instalaciones de bombeo. El pistón de la bomba RHA es metálico.

Otras bombas en esta categoría son las RWA, con un barril de pared delgada y un pistón metálico, y las RSA, con barril de pared delgada y un pistón flexible. (La nomenclatura de los tipos de bombas será explicada detalladamente en la sección 1.3.3)

Figura 7. Sección transversal Bomba RHA



Fuente: Autores del proyecto

Ventajas:

- El ancla superior es recomendada en pozos arenosos porque las partículas de arenas no se pueden asentar sobre el niple de asentamiento debido a la acción continua de lavado de los fluidos bombeados. Por lo tanto, el conjunto de la bomba usualmente no se pega y se puede retirar fácilmente si se requiere mantenimiento.
- Cuando se bombean fluidos gasíferos en pozos con bajos niveles de fluidos, esta bomba trabaja bien porque la válvula fija se sumerge mucho más profundo en los fluidos del pozo que en las bombas ancladas en la parte inferior.
- Un separador de gas se puede conectar directamente al barril de la bomba cuando hay presencia de gas libre.

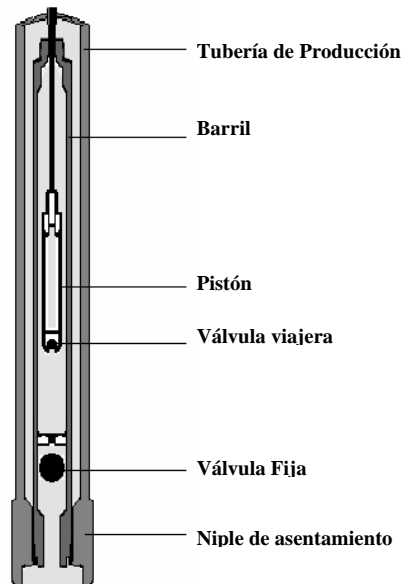
- Si se requiere un barril de más tamaño, el ancla superior proporciona un mejor soporte al conjunto de la bomba que un ancla inferior. El movimiento del barril también puede ser inferior con una acción limitada de fricción del barril contra la tubería de producción.

Desventajas:

- Dada la posición del ancla superior, la parte externa del barril queda con una presión de succión, mientras que la parte interna queda expuesta a una alta presión hidrostática de la columna de líquido en la tubería de producción. El mayor diferencial de presión a través de su pared puede deformar, o incluso, reventar el barril, especialmente si es una pared de tipo delgado.
- En la carrera descendente, el barril queda expuesto a elevadas cargas tensoras ocasionadas por el peso de la columna de líquido que es aguantada por la válvula fija. La resistencia mecánica del barril, por consiguiente, limita la profundidad con la cual se puede utilizar dichas bombas.
- La varilla de la válvula se puede desgastar por la fricción contra su guía y puede convertirse en un acople débil en la sarta de varillas.
- Comparado con las bombas de barril viajero, esta bomba tiene más partes y por consiguiente, los costos iniciales son mayores.

Bombas con Ancla Inferior y Barril Estacionario: La sección transversal de una bomba RHB durante el recorrido ascendente se observa en la figura 8. Esta bomba es la que primero se debería considerar para el trabajo en pozos profundos. El barril de trabajo está agarrado a la tubería, en la parte inferior del conjunto de la bomba, lo cual tiene ventajas definitivas en pozos profundos. Las bombas RHB tienen pistones metálicos y barriles de pared gruesa. Las bombas RWB tiene un barril con pared delgada y las bombas RSB tiene un barril de pared delgada y un pistón flexible. (La nomenclatura de los tipos de bombas será explicada detalladamente en la sección 1.3.3)

Figura 8. Sección transversal de una bomba de varillas Ancla Inferior y Barril Estacionario.



Fuente: Autores del proyecto

Ventajas:

- El exterior del barril siempre está abajo presión hidrostática ejercida por la columna de líquido en la tubería de producción. En consecuencia, el diferencial de presión a través de la pared del barril es mucho menor que en las bombas con ancla superior, haciendo que el barril quede menos propenso a un daño mecánico. Por consiguiente, esta bomba se puede utilizar en regiones más profundas que las bombas de varillas de anclaje superior.
- El empleo de esta bomba es aconsejable en pozos con bajos niveles de fluidos porque se puede poner a funcionar muy cerca del fondo del pozo, el punto más profundo del mecanismo de bombeo, será el niple de asentamiento.
- La válvula fija es usualmente más grande que la válvula viajera y esta característica asegura una entrada regular a la bomba. La tendencia a la espumación de los fluidos del pozo también se reduce.

- En los pozos desviados, el barril puede pivotar sobre el niple de asentamiento, lo cual reduce el desgaste.

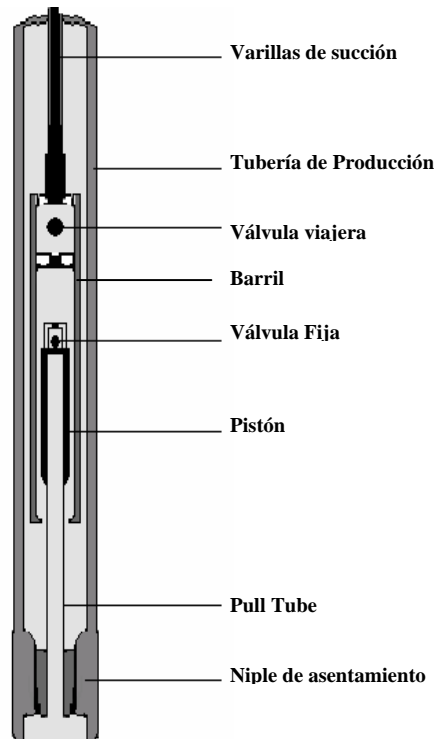
Desventajas:

- Durante el período de descanso o en una operación intermitente, la arena u otras partículas sólidas se pueden asentar en la parte superior del pistón, las cuales se pueden pegar al barril cuando se encienda nuevamente la bomba.
- El espacio anular ente la tubería y el barril se puede llenar con arena u otros sólidos impidiendo la sacada de al bomba.
- La varilla de la válvula puede convertirse en un punto débil comparado con la sarta de varillas.
- El costo de la bomba es más alto que las bombas con barril viajero debido a la mayor cantidad de partes.

Bombas de Varillas con Barril Viajero: La operación de cualquier bomba de pistón se fundamenta en el movimiento relativo que existe entre el pistón y el cilindro. A partir de esta situación, se dice entonces que la misma acción de bombeo se logra en una bomba de varillas si el pistón es estacionario y se mueve al barril. Las bombas de varillas con barril viajero operan sobre este principio y el pistón se mantiene en su lugar mientras el barril es movido por la sarta de varillas. La posición del ancla o agarre invariablemente es en el fondo del ensamble de la bomba. La figura 9 presenta una sección transversal de una bomba RHT. El pistón viene agarrado al ancla de fondo por un pequeño tubo de arrastres hueco, a través del cual los fluidos del pozo entran a la bomba.

La válvula fija, situada en la parte superior del pistón, es más pequeña que la válvula viajera. Las bombas con pared delgada están codificadas con las letras RWT y aquellas con un pistón flexible con las letras RST. (La nomenclatura de los tipos de bombas será explicada detalladamente en la sección 1.3.3)

Figura 9. Sección transversal de una bomba RHT



Fuente: Autores del proyecto

Ventajas:

- El barril viajero mantiene el fluido en movimiento alrededor del ancla, evitando que la arena y otros sólidos se asiente entre el niple de asentamiento y el ancla. Por lo tanto, el conjunto para retirar la bomba usualmente está libre de problemas.

Esta bomba es recomendada para el bombeo intermitente de pozos arenosos ya que la arena no se puede quedar entre el pistón y el barril durante los períodos de cierre.

- La conexión entre la sarta de varillas y el barril viajero es más fuerte que entre la varilla de la válvula y la sarta de varillas en las bombas con barril estacionario.
- Tiene una construcción resistente, con menos partes que las bombas con barril estacionario y menos costoso.

Desventajas:

- El tamaño de la válvula es limitado por que se fija al barril. Es una válvula relativamente más pequeña que ofrece una alta resistencia al flujo del fluido, permitiendo que el gas se separe de la solución, originando así una deficiente operación de al bomba en los pozos gasíferos.
- En los pozos profundos, la elevada presión hidrostática que actúa sobre la válvula fija, en el recorrido descendente, podría ocasionar el doblamiento del tubo extractor y se puede originar un excesivo desgaste entre el pistón y el barril. Esto limita la longitud del barril que se puede usar en pozos profundos.
- El bombeo de fluidos altamente viscosos no es recomendado ya que la válvula fija puede producir una caída de presión a al entrad de al bomba.

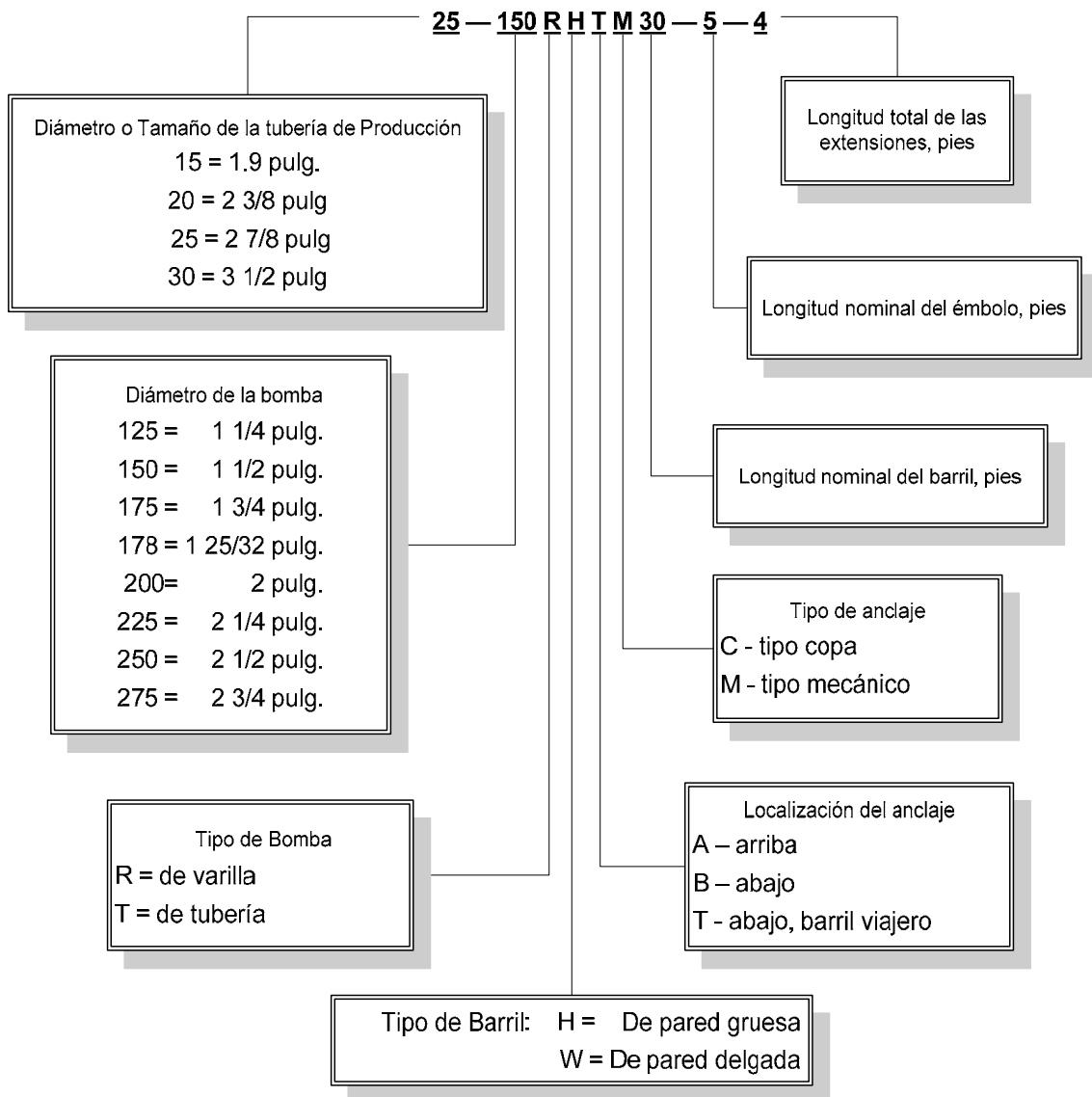
Figura 10. Tipos de bombas



Fuente: Autores del proyecto

1.3.2 Nomenclatura API para las bombas de subsuelo. Con el fin de especificar completamente el conjunto de piezas del bombeo mecánico, el American Petroleum Institute (API) propuso el empleo de una designación de 12 caracteres en la **Especificación API 11 AR**. Esta especificación se utiliza ampliamente en todo el mundo para las bombas con varillas que son generalmente aceptadas.

Figura 11. Ejemplo y descripción de la nomenclatura API de las bombas de subsuelo.



Fuente: M.Sc. PÁEZ CAPACHO, Ruth. Curso de Sistemas de levantamiento artificial y facilidades de superficie.

Los tamaños de las bombas también están estandarizados por el API. El tamaño básico de una bomba se refiere al diámetro interno del barril.

1.4 SARTA DE VARILLAS

La sarta de Varillas es la parte más vital del Sistema de Bombeo Mecánico ya que proporciona el vínculo entre la unidad de Bombeo en la superficie y la bomba de subsuelo. El comportamiento de la sarta de Varillas puede tener un impacto fundamental sobre la eficiencia del levantamiento del fluido y su eventual falla origina una pérdida total de la producción. Por consiguiente, una Sarta de Varillas diseñada apropiadamente no solo asegura buenas condiciones de operación, sino que también puede reducir considerablemente los costos totales de producción.

La Sarta de Varillas esta compuesta de varillas de succión individual, conectada unas con otras, hasta alcanzar la profundidad requerida de bombeo. Las primeras instalaciones de bombeo usaron postes de madera, con acoples finales en acero para facilitar la unión entre las varillas. Luego, con la perforación de pozos más profundos, se requirió mayor resistencia de las varillas, y a principios de siglo hicieron su aparición las varillas de acero sólido con extremos forjados para acomodar roscas hembras o macho, un diseño que hasta la fecha no ha cambiado. Los avances más importantes en los métodos de la fabricación de la varilla de succión durante los últimos años son la aplicación de un tratamiento al calor para mejorar la resistencia a la corrosión, mejores construcciones en el pin y el empleo de rodillos en lugar de cortes para hacer precisas las roscas. Las varillas de Acero, diferentes a las del tipo sólido, también quedaron disponibles, así como también, la varilla de succión hueca o tubo de varilla, la varilla continua y la varilla flexible.

Las varillas generalmente son fabricadas 100% acero. Existen sartas parcialmente en acero y fibra de vidrio, las cuales son utilizadas en locaciones con problemas de corrosión, para reducir cargas en la unidad de bombeo, para evitar comprar unidades excesivamente grandes o para incrementar la tasa de producción. La longitud de varillas más común en acero es 25-30 pies y en fibra de vidrio es 37.5 pies, por lo cual las segundas reduce el número de acoples y hace que la sarta

sea más ligera. La varilla de acero sólido es el tipo de varilla más utilizado y ha sido estandarizada por el American Petroleum Institute desde 1926 como será descrito en la siguiente sección. De acuerdo con la última especificación API 11B, las varillas de succión vienen en presentaciones de 25 o 30 pies (7.6 o 9.1 metros) de largo. Los diámetros de la varilla van desde ½ pulgada a 1 1/8 de pulgada con incrementos de 1/8 de pulgada.

1.4.1 Tipo de varillas y acoples. El material de las varillas de Succión en acero normalmente tiene un contenido de Hierro de más del 90%. Los elementos de aleación son agregados para incrementar la resistencia, dureza y mejorar los efectos de los tratamientos metalúrgicos y combatir la corrosión. Los aceros utilizados para la fabricación de las varillas son Aceros al carbono y Aceros de Aleación. Los Aceros al Carbono contienen Carbono, Manganeso, Silicio, Fósforo y Azufre. Los Aceros de Aleación contienen elementos adicionales, además de los anteriores. Los diversos fabricantes ofrecen distintas composiciones bajo numerosos nombres comerciales.

El Instituto Americano del Petróleo, en su especificación 11B, presenta la composición química base de los aceros recomendados para la fabricación de las varillas de bombeo.

Tabla 2. Propiedades Químicas y Mecánicas de los materiales de una varilla de succión API de acuerdo con la especificación API 11B.

Grado de Varilla	Composición	Fuerza de Tensión, psi	
		Mínima	Máxima
K	AISI 46	85000	115000
C	AISI 1536	90000	115000
D	Carbono o Aleaciones	115000	140000

Fuente: Ecopetrol S.A.

De acuerdo con el API Especificación 11B, las varillas grado K, son fabricadas con acero tipo AISI A-46XX aleación Níquel-Molibdeno de baja resistencia, el cual tiene una resistencia aceptable al ataque de H₂S, y sólo deberá ser sometido a cargas en el rango de 25.000 a 28.000 psi de trabajo. Dado su contenido de níquel, el grado K es considerablemente más costoso que el grado C, pero igual puede ser utilizado en algunas aplicaciones especiales.

Las varillas grado C, corresponden a un acero al Carbono -Manganeso tipo AISI 10XX o 15XX, siendo el más económico de todos los grados disponibles y el de menor resistencia a la corrosión. Su empleo se limita a aquellos diagramas de cargas con límites entre los 30.000 y 33.000 psi de trabajo. Este tipo de material debe ser protegido con inhibidores químicos si se va a exponer en ambientes corrosivos.

En la categoría grado D, el API estipula tres tipos de acero a saber; en acero al Carbono-Manganeso tipo AISI 10XX o 15XX con una resistencia de 36.000 a 38.000 psi de trabajo, en acero aleado al Cromo-Molibdeno tipo AISI 41XX de alta resistencia, con un rango entre 40.000 y 45.000 psi de trabajo y en acero especial cuya composición química debe tener un contenido mínimo de cromo, níquel y molibdeno de 1.15% en la mezcla. Todas las varillas grado D deben ser protegidas de fluidos corrosivos.

Las varillas de fibra de vidrio están disponibles en resinas de poliéster y en resinas de ésteres vinílicos con vidrio y se fabrican mediante un proceso conocido como extrusión por estirado. El éxito de su rendimiento está en la conexión. Su carga máxima está en el rango de 35.000 a 38.000 psi de trabajo.

Los diámetros externos para las varillas de acero varían de 5/8" a 1-1/2", mientras que las de fibra de vidrio se proveen en diámetros externos de 7/8" a 1-1/4".

Tabla 3. Composición química y dureza de los acoples.

Clase	Dureza	Composición química normas AISI
T	56-62 HRA	Acero con contenido de azufre menor a 0.05%
SM	Material Base: 56-62 HRA Recubrimiento: 595 HV200 mínimo	menor a 0.05%, con un recubrimiento base Níquel

Fuente. Ecopetrol S.A.

1.5 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL EQUIPO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO MECANICO

El diseño de una instalación completa debe considerar el comportamiento de todos los elementos del sistema. Existen formulas básicas para el cálculo de varios factores que afectan la selección de un sistema apropiado, sin embargo las fórmulas son inexactas y algunos análisis o diseños se deben apoyar en la experiencia local. La mínima cantidad de información que se debe conocer, asumir o calcular para determinar las cargas aproximadas y el desplazamiento de la bomba para el diseño e instalación de una unidad debe incluir:

- Nivel de Fluido [pies]
- Profundidad de la Bomba, [pies]
- Velocidad de Bombeo, [Spm]
- Longitud del recorrido en superficie, [in]
- Diámetro del pistón, [in]
- El diámetro nominal del Tubing, [in]
- Tamaño y diseño de la sarta de varillas
- Geometría de la Unidad

Partiendo de esta información se podría obtener los siguientes datos:

- Desplazamiento de la bomba, [B/D]
- Máxima y Mínima carga sobre la barra lisa, [lb]
- Máximo Torque, [Lb-Pulg]
- Caballaje de la carga máxima, [HP]
- Contrabalance Requerido, [lb]

Para poder lograr el mejor diseño se debe pasar por una serie de métodos de ensayo y error buscando la mejor configuración entre bomba, varillas y unidad de bombeo que satisfagan el requerimiento deseado. Para diseñar este sistema de levantamiento se siguen los siguientes pasos:

1. Hacer una selección preliminar de los componentes del diseño.
2. Calcular las características operacionales usando formulas básicas, tablas y figuras presentadas.
3. Las cargas y el desplazamiento de la bomba calculadas se comparan con los volúmenes, rangos de cargas y de esfuerzos previamente seleccionados.

Luego de estos pasos puede hacerse necesario realizar nuevamente algunos de los cálculos u otra selección de los componentes para que concuerden con las limitaciones del sistema hasta obtener las condiciones de operación óptimas. Problemas en el sistema de bombeo pueden ser solucionados a través del seguimiento del comportamiento de los fluidos producidos utilizando dinagramas, sonolog y revisando las bombas de subsuelo después de los trabajos o servicios a los pozos, entre otros. En lo referente a la selección del equipo de fondo los aspectos más relevantes son la selección de la bomba y la sarta de varillas.

Selección de la bomba

Para una profundidad de bombeo y un volumen de fluido deseado, existe un tamaño de bomba óptimo lo cual conlleva a un efectivo recorrido del pistón y en el mantenimiento de una velocidad moderada de operación. Si el pistón es muy grande, se impondrán cargas innecesarias sobre el equipo y el corto recorrido del pistón puede ocasionar una operación ineficiente, por otro lado, si el pistón es muy pequeño se tendrían velocidades de bombeo muy altas y el incremento en los efectos (inerciales) de aceleración podría ocasionar incrementos en las cargas sobre el equipo. El factor básico en la selección del tamaño de la bomba adecuada es el volumen de fluido desplazado por la bomba por cada carrera. Este volumen desplazado dependerá del diámetro de la bomba. El desplazamiento teórico total de bomba se puede determinar como sigue:

$$PD = 0.1484 AP SP N \quad (1)$$

Donde:

PD: Desplazamiento total de la bomba, [B/D]

AP: Área transversal del pistón, [in²]

SP: Recorrido (stroke) efectivo del pistón, [in]

N: Velocidad de bombeo en número de strokes por minuto.

La ecuación anterior también puede escribirse en función del diámetro del pistón de la bomba así:

$$PD = 0.1166 DP^2 SP N \quad (2)$$

La tasa de producción real en superficie, Q, puede ser menor que el desplazamiento teórico de la bomba debido a la eficiencia volumétrica de la bomba, $E_v = Q/PD$.

Las eficiencias volumétricas pueden variar en un amplio rango pero más comúnmente entre 70-80%.

Selección de la Sarta de varillas

Para profundidades mayores de 3500 pies usualmente se emplea una sarta de varillas combinada, que consta de varillas de diferentes diámetros. Las cargas mínimas y máximas esperadas durante un ciclo de bombeo para una sarta de varillas dada deben ser determinadas tan exactamente como sea posible para seleccionar o diseñar el equipo de superficie apropiado para soportar dichas cargas.

Para la selección del equipo de superficie se deben considerar varios factores como son: Carga de Contrabalance, Factor de Torque

Contrabalance

Cuando la unidad es apropiadamente contrabalaceada el trabajo requerido por el convertidor de potencia durante la primera (upstroke) y la segunda mitad (downstroke) del ciclo será aproximadamente igual. Asimismo, el torque ejercido sobre el reductor de velocidades será aproximadamente igual durante ambas mitades del ciclo.

Consideraciones sobre el Torque

Aplicado a las unidades de bombeo, el torque se refiere al número de libras por pulgada de fuerza aplicada al crank por el eje de baja velocidad del engranaje reductor que a su vez es creada por el pitman debido a las cargas del pozo y al efecto de oposición ocasionado por el momento del contrabalance y el motor principal.

2. DINAGRAMA

Es un instrumento indispensable cuando se utiliza bombeo mecánico como levantamiento artificial. Éste registra y mide en forma continua las cargas y las deformaciones que soporta el vástago pulido y como resultado muestra las cartas dinamométricas correspondientes que deben ser interpretadas para determinar los problemas que existen en el fondo del pozo y dar las soluciones pertinentes. El gráfico final representa la Carga vs. Posición y se obtiene conociendo la carrera correspondiente del vástago del balancín.

El bombeo mecánico sigue siendo el método de levantamiento artificial más utilizado. Los métodos para analizar el desempeño del sistema de bombeo mecánico se basan en el desarrollo del dinamómetro realizado por Gilbert¹ y Fagg², donde la carga en la varilla lisa se registra gráficamente en función de su posición, para generar una gráfica que representa el trabajo hecho en superficie por la unidad de bombeo mecánico para cada carrera de la bomba.

Los primeros dinamómetros fueron utilizados a principios de los años veinte, desde entonces, tanto el hardware como los métodos de evaluación han mejorado considerablemente haciendo que la medición simultánea de diversos parámetros dinámicos (kilovatios de entrada, factor de potencia, torque del motor, torque de la caja reductora, velocidad, aceleración, carga, etc.) sea económicamente posible, es así que las primeras y más importantes interpretaciones cualitativas, se han convertido en métodos de análisis exactos, sofisticados y altamente confiables.

La característica básica del dinamómetro electrónico es que los transductores electrónicos (en lugar de los dispositivos mecánicos o hidráulicos) son utilizados

¹Gilbert, W.E., "An Oil Well Pumping Dynagraph," API Drilling and Production Practice, 1936, pp

²Fagg, W., "Dynamometer Charts and Weighing," Petroleum Transactions, AIME, Vol. 189, 1950, pp

para medir las cargas del pozo y los desplazamientos de la varilla. Un dinamómetro de este tipo permite no sólo elaborar las cartas dinamométricas de superficie, sino también, suministra datos básicos para construir las cartas dinamométricas de fondo.

Los desarrollos mas recientes se han concentrado en refinar las técnicas de interpretación de las características de esta curva de carga-desplazamiento para lograr un análisis detallado del sistema, dentro de estos desarrollos cabe mencionar:

- El porcentaje de llenado de la bomba.
- El desplazamiento de la bomba en barriles por día.
- Operación y fuga de las válvulas de la bomba
- Distribución de carga en la sarta de varillas
- Carga de fatiga y colapso de varillas
- El desplazamiento efectivo del pistón de la bomba.
- La velocidad de bombeo.
- Si las cargas máxima y mínima de la barra lisa están dentro de la capacidad de la unidad de bombeo y de las varillas

2.1 TIPOS DE DINAGRAMA

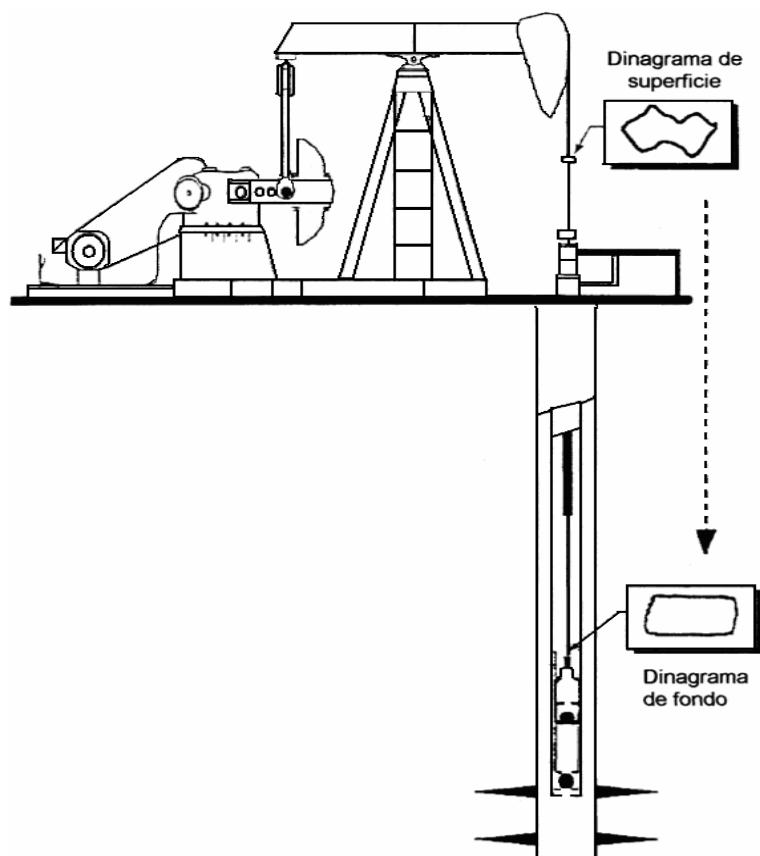
Existen dos tipos de Dinagramas, Dinagrama de superficie y Dinagrama de fondo, siendo este último el más adecuado y más fácil de interpretar ya que su forma depende únicamente de los que este pasando en la bomba.

2.1.1 Dinagrama de superficie. El Dinagrama de superficie es un registro de cargas, sobre la barra pulida para determinar en superficie el comportamiento de la bomba durante cada ciclo de bombeo.

2.1.2 Dinagrama de fondo. Para entender la forma de un Dinagrama de fondo es necesario comprender las condiciones físicas en las que esta operando el barril, el pistón y las válvulas en el ciclo de bombeo.

Un Downhole card o Dinagrama de fondo es un Dinagrama de “Carga Vs Posición” de la primera varilla por encima de la bomba y es obtenido por medio de la ecuación de onda mediante la cual se construye la carta de fondo de la bomba y se determina la carga sobre los tramos de varilla

Figura 12. Grafica que muestra los dos tipos de dinagramas y las posiciones de donde son construidos



Fuente: NAVARRETE, JUAN CARLOS. TORREZ, JUAN EFE. Rediseño del levantamiento artificial por bombeo mecánico mediante el análisis de dinagramas

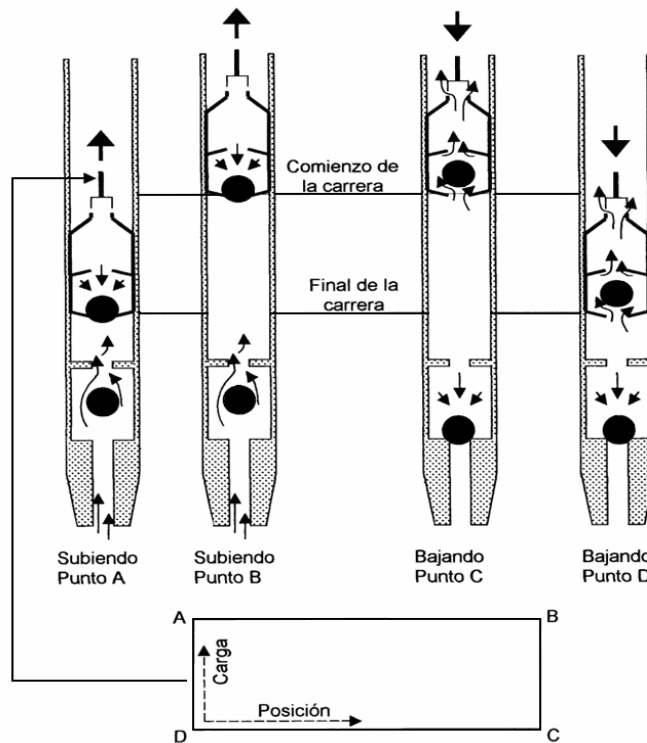
Algunas de las diferencias de estos dos tipos de Dinagramas radican en que el Dinagrama de superficie depende de factores como:

- Profundidad de la bomba
- Diseño y material de la sarta de varillas
- Velocidad de bombeo
- Tipo de unidad de bombeo
- Tipo de motor
- Condiciones de operación de la bomba

En cambio el análisis y la forma de un dinagrama de fondo solo depende de las condiciones de operación de la bomba. Esto hace mucho más fácil el análisis cualitativo de la calidad o eficiencia de operación y se puede determinar cuáles son los problemas que disminuyen la producción.

En la actualidad se cuenta con Dinamómetros digitales con software que calculan un Dinagrama de fondo a partir de un Dinagrama de superficie.

Figura 13. Dinagrama de fondo teórico con bomba llena



Fuente: NAVARRETE, JUAN CARLOS. TORREZ, JUAN EFE. Rediseño del levantamiento artificial por bombeo mecánico mediante el análisis de dinagramas

Partes que conforman la carta:

- A. Carrera ascendente
- B. Fin de la carrera ascendente e inicio de la carrera descendente
- C. Carrera descendente
- D. Fin de la carrera descendente e inicio de la carrera ascendente

2.2 INTERPRETACION DE DINAGRAMAS

Se ha determinado que la toma de cartas dinamométricas es útil para detectar los problemas que existen en el campo cuando el sistema de bombeo mecánico no produce y también para encontrar las posibles soluciones. La interpretación consiste en un análisis cualitativo de la carta donde además se pueden jugar con

algunos parámetros de diseño. Por lo tanto, cualquier variación de alguno modificará la carta dinamométrica correspondiente.

Existe una serie de síntomas que permiten confeccionar un diagnóstico eficiente al pozo que se estudia complementándose en la mayoría de los casos con la medición de nivel usando el ecómetro.

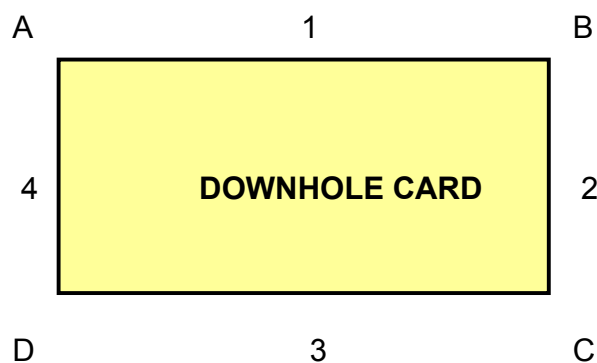
2.2.1 Proceso para identificar las partes de un “Downhole card” y sus problemas.

Para estar en capacidad de realizar un análisis cualitativo a un dinagrama de fondo o “Downhole card” se puede lograr de dos maneras posibles.

1. Aprenderse todas las formas de los problemas que puede presentar la bomba de subsuelo.
2. Saber identificar las partes de un “downhole card” y los problemas que pueden cambiar su forma.

Para la segunda opción se debe comprender las partes que conforman la carta:






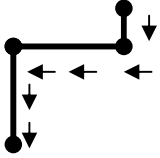




Figura 14. Regiones de un dinagrama.







Fuente: Autores del proyecto.

1. Carrera ascendente. Tramo 1 de A @ B
2. Fin de la carrera ascendente e inicio de la carrera descendente.
Tramo 2 de B @ C.
3. Carrera descendente. Tramo 3 de C @ D
4. Fin de la carrera descendente e inicio de la carrera ascendente.
Tramo 4 de D @ A

Tabla 4. Forma eficiente y deficiente de las regiones de un dinagrama.

EFICIENTE	DEFICIENTE	CAUSA
		<p>Fuga en la válvula viajera, fricción excesiva o en algunos casos es muestra de fuga en la tubería de producción. Tramo A-B</p>
		<p>Un golpe o fricción que aumenta o disminuye la carga sobre el pistón. Tramo A-B</p>
		<p>Golpe de fluido o barril deficientemente lleno de líquido. Tramo B-C</p>
		<p>Golpe de gas o barril deficientemente lleno de líquido Tramo B-C</p>
		<p>Fuga en la válvula fija o fricción excesiva Tramo C-D</p>

		Golpe o fricción en el pistón Tramo C-D
		Fuga en la válvula viajera causada por arena o fluidos emulsificados Tramo D-A

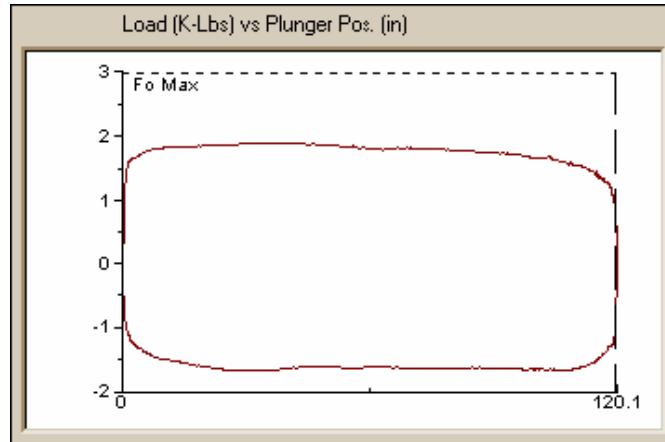
Fuente: Autores del proyecto

2.3 DINAGRAMAS DE LOS PROBLEMAS MAS REPRESENTATIVOS.

Las siguientes gráficas muestran las cartas dinamométricas de fondo y su respectiva interpretación, para ocho casos que se encuentran con alta frecuencia.

2.3.1 Buen llenado de bomba con tubería anclada. Durante el bombeo la tubería de producción suele sufrir el efecto del pandeo, que en ocasiones afecta significativamente la eficiencia de la bomba, por lo cual es necesaria la instalación del ancla de tubería. La figura 15 muestra una carta dinamométrica, de una prueba realizada a un pozo el cual tiene la tubería anclada:

Figura 15. Dinagrama con Buen llenado de Bomba y Tubería Anclada.

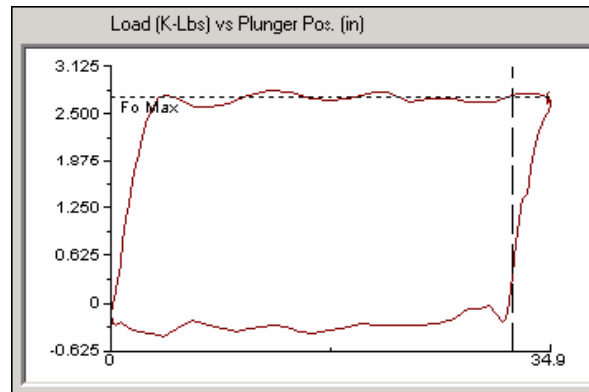


Fuente: Manual Echometer

El dinagrama de fondo muestra una gráfica que se asemeja bastante a un rectángulo, esto se debe a que la bomba está presentando un muy buen llenado, y además a que la tubería se encuentra anclada. Del dinagrama anterior se puede decir que el pozo se encuentra operando en óptimas condiciones.

2.3.2 Buen llenado de bomba con tubería no anclada. En ocasiones el efecto del pandeo no afecta considerablemente la eficiencia de la bomba, este es caso que muestra la figura 16. Como en el caso anterior esta carta dinamométrica también muestra un buen llenado de bomba, pero con la diferencia que la tubería no se encuentra anclada, esto se nota en la inclinación que presenta la gráfica.

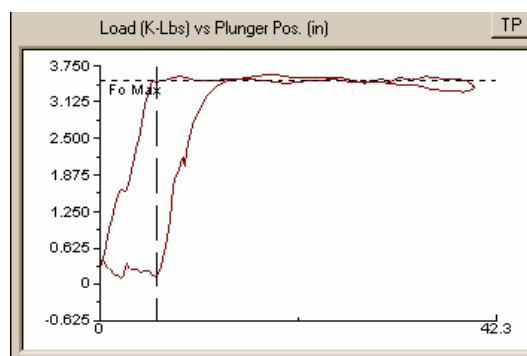
Figura 16. Dinagrama con Buen llenado de Bomba y Tubería Desanclada



Fuente: Manual Echometer

2.3.3 Golpe de fluido. Por lo general existen diseños en los que la producción no se equipara con la restauración del pozo y se puede presentar un golpe de fluido por no poseer un buen nivel en el pozo, es decir que el pistón no se llena en su totalidad y cuando el pistón baja pega un golpe fuerte en el fluido.

Figura 17. Dinagrama de Bomba con Alto Golpe de Fluido.



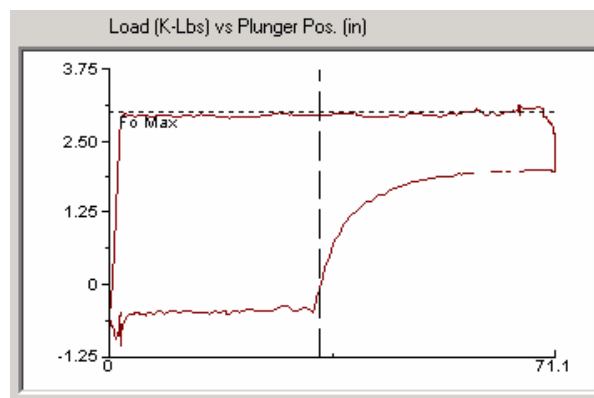
Fuente: Manual Echometer

La figura 17 muestra una carta dinamométrica que representa un severo golpe de fluido. Dependiendo de las facilidades que se tengan en el campo se pueden recomendar tres posibles soluciones para este caso:

- Disminución de la velocidad de bombeo.
- Reducción de la longitud del stroke.
- Aumento de la profundidad de la bomba para darle mayor sumergencia.

2.3.4 Bloqueo por gas. Las bombas se encuentran diseñadas para manejar el bombeo de líquido y no de gas, por lo cual se presentan problemas cuando el gas penetra en la bomba, este causa un efecto llamado bloqueo por gas, que disminuye la eficiencia de bombeo, este caso se ilustra en la figura 18.

Figura 18. Dinagrama de Bomba Bloqueada por Gas.



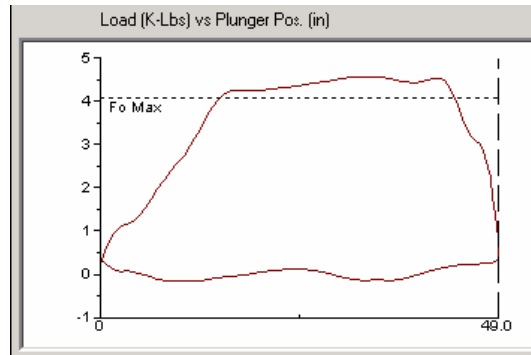
Fuente: Manual Echometer

En este caso el problema se debe al bloqueo de la bomba por compresión de gas, el cual reduce significativamente el llenado de la bomba. Para este problema una solución sería dejar la salida del revestimiento abierta, si con esta medida no es suficiente, debe analizarse la viabilidad de instalar un separador de gas.

2.3.5 Mal funcionamiento de la válvula viajera. Otro problema que se presenta con bastante frecuencia es la pérdida de carga debida a fugas en la válvula

viajera, la figura 19 muestra una carta dinamométrica en la que se evidencia este problema:

Figura 19. Dinagrama con Mal Funcionamiento de Válvula Viajera.

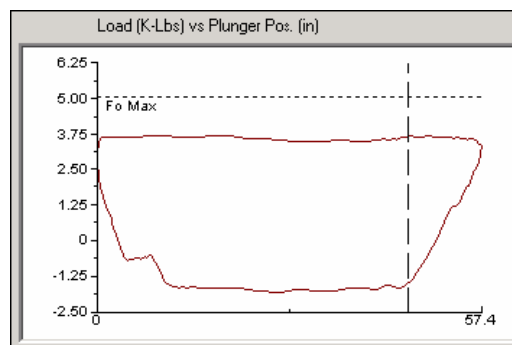


Fuente: Manual Echometer

La carta dinamométrica anterior presenta una gran pérdida de carga en la válvula viajera, que se puede notar claramente al inicio y al final de la carrera ascendente.

2.3.6 Mal funcionamiento de la válvula fija. De igual manera que la válvula viajera, la válvula fija puede presentar fugas, este es el caso que ilustra la figura 20.

Figura 20. Dinagrama con Mal Funcionamiento de Válvula Fija.

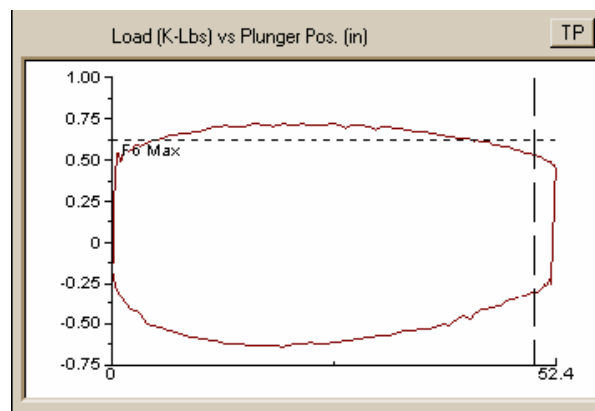


Fuente: Manual Echometer

Este dinagrama muestra un mal funcionamiento de la válvula fija, el cual afecta significativamente el llenado de la bomba.

2.3.7 Mal funcionamiento de ambas válvulas. Este caso presenta simultáneamente la falla de ambas válvulas y puede verse en la figura 21:

Figura 21. Dinagrama con Mal Funcionamiento de Ambas Válvulas.

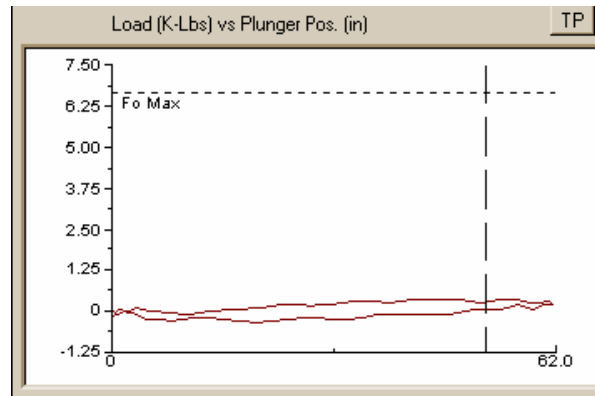


Fuente: Manual Echometer

En este caso se presenta mal funcionamiento de las válvulas de la bomba, tanto la fija como la viajera, debido a este mal funcionamiento en la carta dinamométrica se encuentran curvaturas en la parte superior e inferior, correspondientes a las pérdidas en la válvula viajera y a la fija respectivamente.

2.3.8 Varilla partida. Este problema se debe ya sea al rompimiento de la varilla o a que la sarta de varillas se haya desenroscado. La carta típica que se presenta en este caso se muestra en la figura 22:

Figura 22. Dinagrama Típico de un Pozo con Varilla Partida.



Fuente: Manual Echometer

El dinagrama anterior muestra el caso en que la sarta de varillas se encuentra partida o desconectada, en esta situación la única solución es sacar y reparar la sarta de varillas.

3. REDES NEURONALES ARTIFICIALES.

En los capítulos anteriores se realizó una breve descripción de las generalidades del bombeo mecánico y específicamente en la forma de monitorear e identificar problemas del equipo de subsuelo por medio de dinagramas, con lo cual se completa la descripción del problema a tratar en este proyecto; como siguiente paso en este capítulo se describe la herramienta con la cual resolvemos el problema de interpretación, sus principios básicos de funcionamiento, sus componentes, su clasificación, entre otras de sus características.

3.1 QUE ES UNA RED NEURONAL ARTIFICIAL:

Las redes neuronales artificiales (RNA) son un elemento importante de las denominadas tecnologías de Inteligencia Artificial (IA). La IA es " la rama de la ciencia de la computación que estudia la resolución de problemas no algorítmicos mediante el uso de cualquier técnica de computación disponible, sin tener en cuenta la forma de razonamiento subyacente a los métodos que se apliquen para lograr esa resolución."(Farid Fleifel Tapia).

Las redes neuronales artificiales se basan en la eficiencia de los procesos llevados a cabo por el cerebro y se inspira en su funcionamiento, estas emulan el comportamiento de las redes neuronales biológicas, y se han utilizado para aprender estrategias de solución basadas en ejemplos de comportamiento típico de patrones; estos sistemas no requieren que la tarea a ejecutar se programe, ellos generalizan y aprenden de la experiencia.

Las RNA no ejecutan instrucciones, como lo hacen los sistemas de cómputo tradicionales que procesan la información en forma secuencial, ni tampoco manipulan instrucciones y datos que se localizan en la memoria; estas responden

en paralelo a las entradas que se les presenta; el resultado no se almacena en una posición de memoria y en vez de esto es el estado de la red para el cual se logra equilibrio. El conocimiento de una red neuronal no se almacena en instrucciones, el poder de la red está en su topología y en los valores de las conexiones (pesos) entre neuronas.

Definición: No existe una definición general de red neuronal artificial, en la bibliografía se pueden encontrar diferentes definiciones sobre lo que es una red neuronal y quizás la más completa es la siguiente:

- “Una Red Neuronal Artificial es una estructura compuesta de un número de unidades interconectadas (neuronas artificiales). Cada unidad posee una característica de entrada/salida e implementa una computación local o función. La salida de cualquier unidad esta determinada por su característica de entrada/salida, su interconexión con otras unidades, y (posiblemente) de sus entradas externas. Sin embargo es posible un “trabajo a mano”, la red desarrolla usualmente una funcionalidad general a través de una o más formas de entrenamiento” [Schalkoff, 1997].

Otras definiciones agrupadas y consignadas en el trabajo realizado por Emiliano Aldabas-Rubira³, igualmente importantes son:

- Una nueva forma de computación, inspirada en modelos biológicos.
- Un modelo matemático compuesto por un gran número de elementos procesales organizados en niveles.
- Un sistema de computación hecho por un gran numero de elementos simples, elementos de proceso interconectados, los cuales procesan información por medio de su estado dinámico como respuesta a entradas externas.

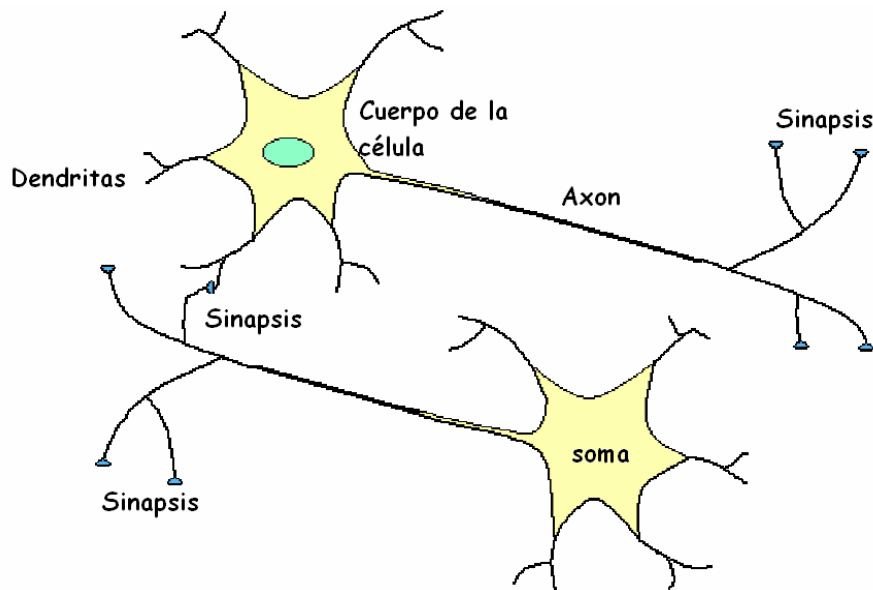
³ ALDABAS-RUBIRA, Emiliano. “Introducción al reconocimiento de patrones mediante redes neuronales”. UPC-Campus Terrassa-DEE-EUETIT Colom, 1 08222 Terrassa Barcelona.

- 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 biológico.

Aunque cada definición aporta información sobre lo que es una red neuronal, para saber como funcionan y en que consisten es necesario desarrollar una explicación extensa, sin embargo, en este trabajo se describirá de la manera mas corta y completa posible.

3.1.1 Funcionamiento de una neurona biológica. En primera instancia El cerebro consta de un gran número (aproximadamente 10¹¹) de elementos altamente interconectados (aproximadamente 10⁴ conexiones por elemento), llamados neuronas. Estas neuronas tienen tres componentes principales, las dendritas, el cuerpo de la célula o soma y el axón. Las dendritas, son el árbol receptor de la red, son como fibras nerviosas que cargan de señales eléctricas el cuerpo de la célula. El cuerpo de la célula, realiza la suma de esas señales de entrada. El axón es una fibra larga que lleva la señal desde el cuerpo de la célula hacia otras neuronas. El punto de contacto entre un axón de una célula y una dendrita de otra célula es llamado sinapsis, la longitud de la sinápsis es determinada por la complejidad del proceso químico que estabiliza la función de la red neuronal. Un esquema simplificado de la interconexión de dos neuronas biológicas se observa en la siguiente figura:

Figura 23. Esquema estructural de dos neuronas biológicas



Fuente: Manual de redes neuronales Universidad Tecnológica de Pereira

Algunas de las estructuras neuronales son determinadas en el nacimiento, otra parte es desarrollada a través del aprendizaje, proceso en que nuevas conexiones neuronales son realizadas y otras se pierden por completo. Las estructuras neuronales continúan cambiando durante toda la vida, estos cambios consisten en el refuerzo o debilitamiento de las uniones sinápticas, por ejemplo se cree que nuevas memorias son formadas por la modificación de esta intensidad entre sinapsis, así el proceso de recordar el rostro de un nuevo amigo, consiste en alterar varias sinapsis.

Todas las neuronas conducen la información de forma similar, ésta viaja a lo largo de axones en breves impulsos eléctricos, denominados potenciales de acción; los potenciales de acción que alcanzan una amplitud máxima de unos 100 mV y duran 1 ms, son resultado del desplazamiento a través de la membrana celular de iones de sodio dotados de carga positiva, que pasan desde el fluido extracelular hasta el citoplasma intracelular; la concentración extracelular de sodio supera enormemente la concentración intracelular.

La membrana en reposo mantiene un gradiente de potencial eléctrico de signo negativo; los iones de sodio no atraviesan con facilidad la membrana en reposo, los estímulos físicos o químicos reducen el gradiente de potencial, y despolarizan la membrana, alcanzado un potencial crítico denominado “umbral”, si estos impulsos son suficientes se produce la activación de la neurona que transmite su impulso por el axón hasta las conexiones sinápticas.

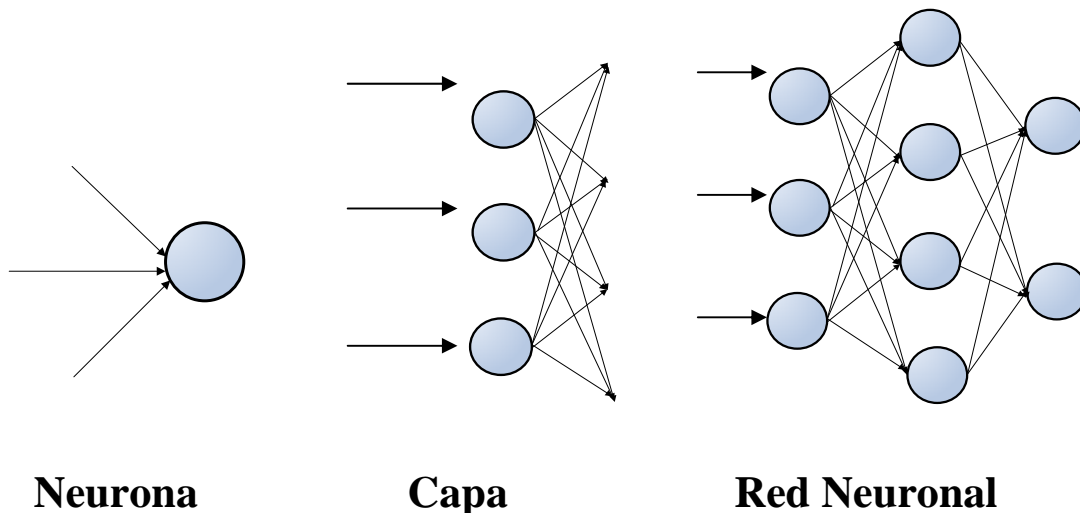
Las sinapsis pueden ser excitatorias o inhibitorias según el neurotransmisor que se libere, cada neurona recibe de 10.000 a 100.000 sinapsis y su axón realiza una cantidad similar de sinapsis. Las sinapsis se clasifican según su posición en la superficie de la neurona receptora en tres tipos: axo-somática, axo-dendrítica, axo-axónica. Los fenómenos que ocurren en la sinapsis son de naturaleza química, pero tienen efectos eléctricos laterales que se pueden medir.

Las RNA no alcanzan la complejidad del cerebro, sin embargo hay dos aspectos similares entre redes biológicas y artificiales, primero los bloques de construcción de ambas redes son sencillos elementos computacionales (aunque las RNA son mucho más simples que las biológicas) altamente interconectados; segundo, las conexiones entre neuronas determinan la función de la red.

3.2 CARACTERÍSTICAS DE UNA RED NEURONAL ARTIFICIAL

Antes de comenzar a describir un neurona artificial es necesario visualizar la forma en la cual esta posicionada estratégicamente en una red neuronal artificial. La figura 24 muestra los elementos o componentes de una RNA.

Figura 24. Elementos principales de una RNA.



Fuente: Autores del proyecto

Dentro de una red neuronal, los elementos de procesamiento se encuentran agrupados por capas, una capa es una colección de neuronas; de acuerdo a la ubicación de la capa en la RNA, esta recibe diferentes nombres

Capa de entrada: Recibe las señales de la entrada de la red, algunos autores no consideran el vector de entrada como una capa pues allí no se lleva a cabo ningún proceso, en este trabajo se seguirá este criterio.

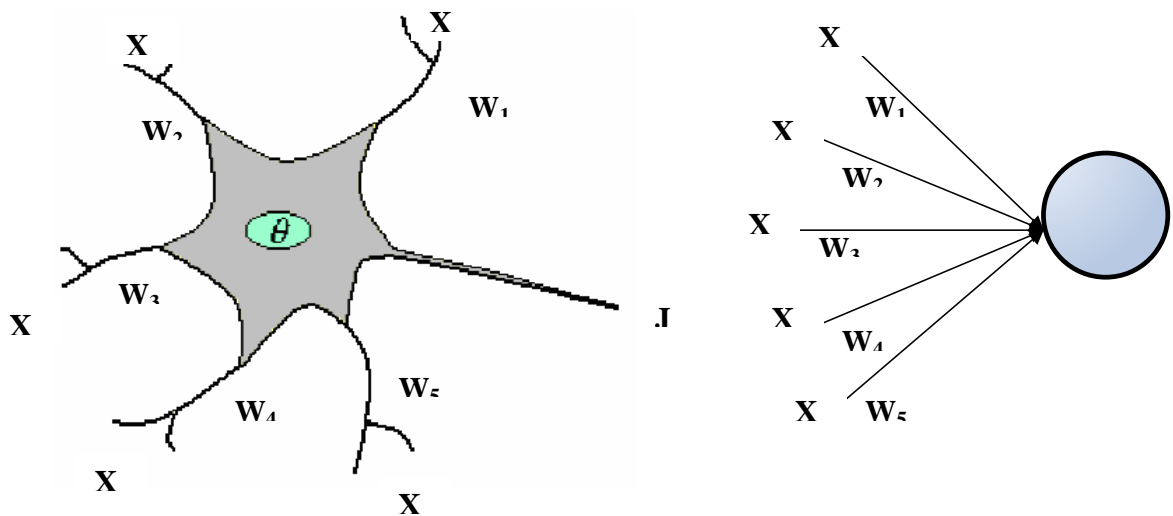
Capas ocultas: Estas capas son aquellas que no tienen contacto con el medio exterior, sus elementos pueden tener diferentes conexiones y son éstas las que determinan las diferentes topologías de la red.

Capa de salida: Recibe la información de la capa oculta y transmite la respuesta al medio externo.

El modelo de una neurona artificial es una imitación del proceso de una neurona biológica como fue descrito anteriormente. Existen varias formas de nombrar una

neurona artificial, como nodo, neuronodo, celda, unidad o elemento de procesamiento. En la siguiente figura 25 se observa una neurona artificial y su similitud con una neurona biológica.

Figura 25. Similitud entre neurona biológica y artificial



Fuente: Autores del proyecto

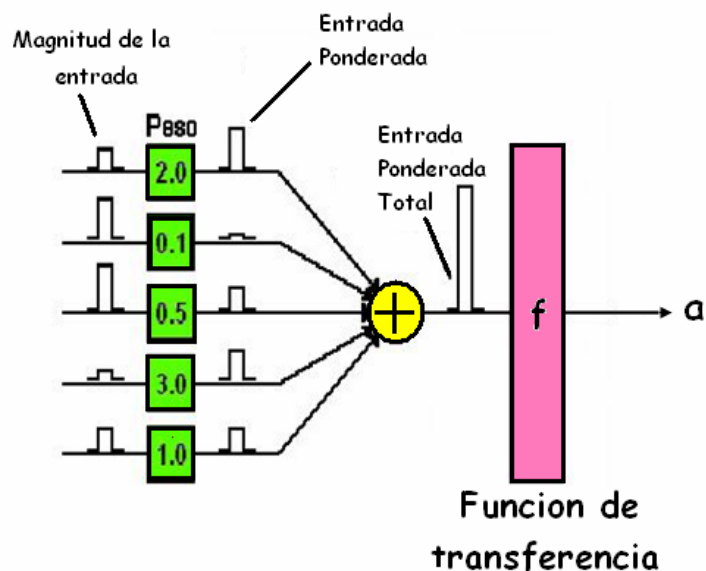
De la observación detallada del proceso biológico se han hallado los siguientes análogos con el sistema artificial:

- Las entradas X_i representan las señales que provienen de otras neuronas y que son capturadas por las dendritas.
- Los pesos W_i son la intensidad de la sinapsis que conecta dos neuronas; tanto X_i como W_i son valores reales.
- θ es la función umbral que la neurona debe sobrepasar para activarse; este proceso ocurre biológicamente en el cuerpo de la célula como fue descrito anteriormente.

3.2.1 Conexiones y funcionamiento de una neurona. En el funcionamiento de una RNA las señales de entrada a una neurona artificial X_1, X_2, \dots, X_n son variables continuas en lugar de pulsos discretos, como se presentan en una neurona biológica. Cada señal de entrada pasa a través de una ganancia o peso, llamado peso sináptico o fortaleza de la conexión cuya función es análoga a la de la función sináptica de la neurona biológica. Los pesos pueden ser positivos (excitatorios), o negativos (inhibitorios). El nodo sumatorio acumula todas las señales de entradas multiplicadas por los pesos o ponderadas y la pasa a la salida a través de una función umbral o función de transferencia.

En una red neuronal ya entrenada, las conexiones entre neuronas tienen un determinado peso ("peso sináptico"). Un ejemplo de una neurona sobre la que convergen conexiones de diferente peso sináptico (W_i) sería:

Figura 26. Esquema general de una neurona artificial.



Fuente: Manual de redes neuronales Universidad Tecnológica de Pereira

El procesamiento de la información llevado a cabo por una neurona o en otras palabras la salida **a** según la figura 26, consiste en una función (f) que opera con los valores recibidos desde las neuronas de la capa anterior, y que tiene en cuenta el peso sináptico de la conexión por la que se recibieron dichos valores (W_i). Así, una neurona dará mas importancia a la información que le llegue por una conexión de peso mayor que no a aquella que le llegue por una conexión de menor peso sináptico. De esta manera la entrada neta a la función (f) de cada neurona esta dada por:

$$Neta = \sum_{i=1}^n W_i * X_i$$

Ecuación 3.1

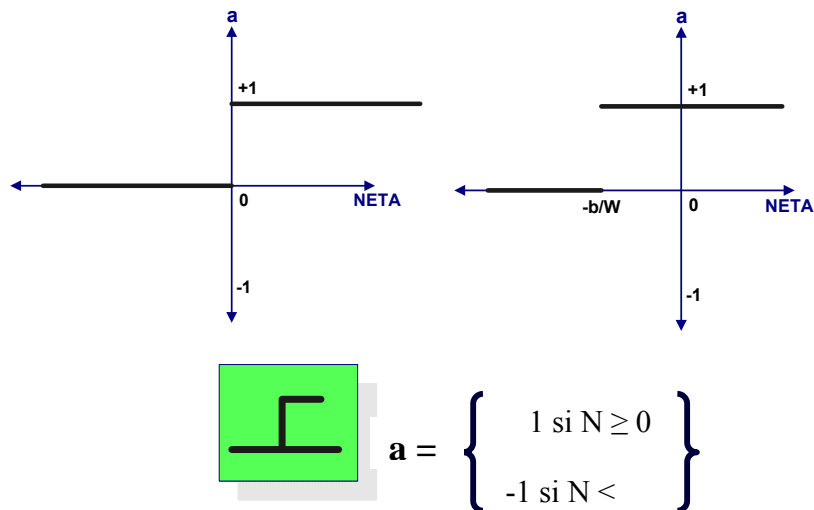
3.2.2 Funciones de transferencia. La salida total de una neurona está determinada por la función de transferencia f, la cual puede ser una función lineal o no lineal de la entrada neta, y que es escogida dependiendo de las especificaciones del problema que la neurona tenga que resolver. Un modelo simple de función de transferencia f sería la llamada **"limitador fuerte" (Hardlim)**.

Función Hardlim: Si el resultado de la entrada neta a la fusión es mayor que el valor umbral (U), la neurona se activa y emite una señal (1) hacia las neuronas de la capa siguiente. Pero, si por el contrario, el resultado es menor que el valor umbral, la neurona permanece inactiva (0):

De esta forma, definido un conjunto inicial de pesos en las conexiones, al presentar un estímulo a la capa de entradas, cada neurona en cada capa realiza la operación descrita anteriormente, activándose o no, de manera que al final del proceso las neuronas generan un resultado (un conjunto de ceros y unos, véase

figura 27), que puede coincidir o no con el que se desea asociar a la entrada o estímulo.

Figura 27. Función de transferencia Hardlim, con y sin ganancia (b).

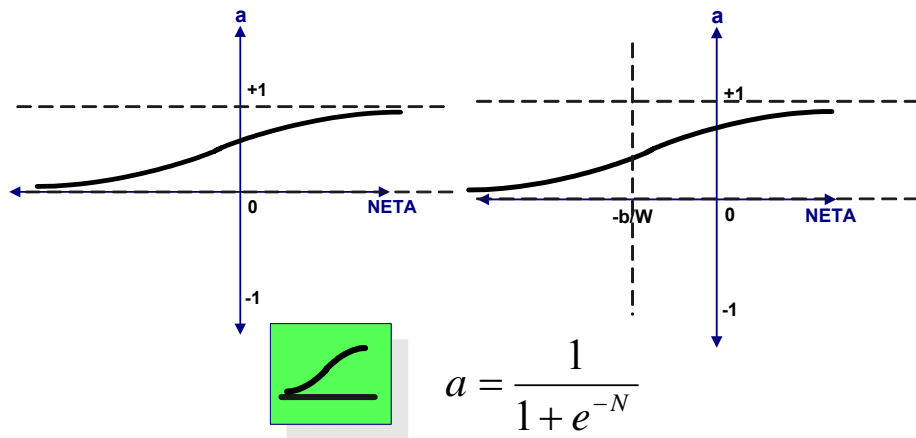


Fuente: Autores del proyecto.

En el entrenamiento de una red neuronal tanto el peso sináptico de las conexiones como el valor umbral para cada neurona se modifican (según un algoritmo de aprendizaje), con el fin de que los resultados generados por la red coincidan con (o se aproximen a) los resultados esperados.

Función de transferencia sigmoideal (logsig): Esta función toma los valores de entrada, los cuales pueden oscilar entre más y menos infinito, y restringe la salida a valores entre cero y uno, de acuerdo a la expresión de la figura 3.6. Esta función es comúnmente usada en redes multicapa, como la Backpropagation.

Figura 28. Función de transferencia Sigmoidal, con y sin ganancia (b).



Fuente: Autores del proyecto

La tabla 5 hace una relación de las principales funciones de transferencia:

Tabla 5. Principales funciones de transferencia

Nombre	Relación Entrada /Salida	Icono	Función
Limitador Fuerte	$a = 0 \quad n < 0$ $a = 1 \quad n \geq 0$		<i>hardlim</i>
Limitador Fuerte Simétrico	$a = -1 \quad n < 0$ $a = +1 \quad n \geq 0$		<i>hardlims</i>
Lineal Positiva	$a = 0 \quad n < 0$ $a = n \quad 0 \leq n$		<i>poslin</i>
Lineal	$a = n$		<i>purelin</i>
Lineal Saturado	$a = 0 \quad n < 0$ $a = n \quad 0 \leq n \leq 1$ $a = 1 \quad n > 1$		<i>satlin</i>
Lineal Saturado Simétrico	$a = -1 \quad n < -1$ $a = n \quad -1 \leq n \leq 1$ $a = +1 \quad n > 1$		<i>satlins</i>
Sigmoidal Logarítmico	$a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$		<i>logsig</i>
Tangente Sigmoidal Hiperbólica	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$		<i>tansig</i>
Competitiva	$a = 1 \quad \text{Neurona con } n \text{ max}$ $a = 0 \quad \text{El resto de neuronas}$		<i>compet</i>

Fuente: Manual de redes neuronales Universidad Tecnológica de Pereira.

3.3 MODELO PERCEPTRÓN

La clasificación de las RNA se realiza de acuerdo al tipo de función de transferencia y tipo de algoritmo o regla de aprendizaje principalmente, encontrando en la literatura un gran número de modelos. Sin embargo, en este trabajo se tratara el tipo más concerniente para la solución de este tipo de problemas, concretamente el reconocimiento de patrones. Por lo tanto nos ocuparemos de aclarar los principios de las *redes neuronales multicapa*.

En este tipo de tarea hay un número fijo de categorías en las cuales las muestras de entrada deben clasificarse. Para ello primero se requiere una fase de entrenamiento en la que se presenta a la red los patrones que debe aprender y la categoría en cual clasificarlo. Entonces se le presenta a la red un patrón nuevo y desconocido pero que pertenece a alguna de las categorías aprendidas y esta debe decidir a que categoría se parece más.

La ventaja de usar redes neuronales tipo perceptrón multicapa está en el hecho que se pueden separar regiones no lineales de decisión tan complicadas como se desee dependiendo del número de neuronas y capas. En adelante en esta sección se describirán las características del modelo perceptrón simple, el modelo perceptrón multicapa y el modelo de propagación hacia atrás o la inversa Backpropagation Network.

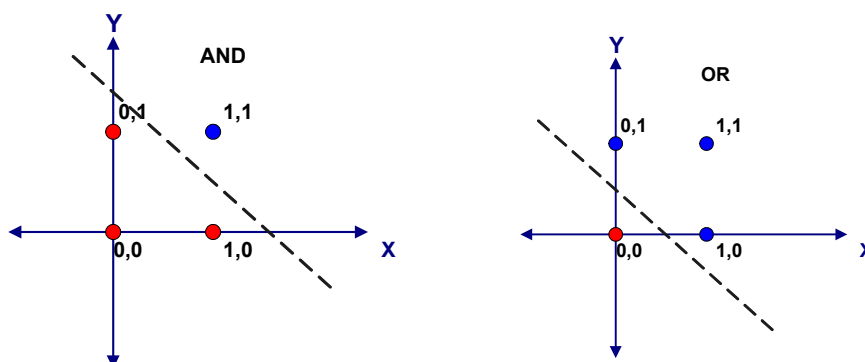
3.3.1 Perceptrón simple. El perceptron, fue expuesto en 1959 por Frank Rosenblatt (Rosenblatt, 1959). El modelo estaba compuesto por dos capas: una capa de entrada de datos y una capa de salida con una única neurona.

Un perceptrón simple se refiere a la unidad básica de inferencia en forma de discriminador lineal, Este perceptrón puede clasificar datos que sean linealmente separables. En e caso de un perceptrón con dos entradas deberá poder trazarse

una única línea que separe las dos clases que permite identificar el perceptrón. El perceptrón separa las regiones por un hiperplano cuya ecuación queda determinada por los pesos de las conexiones y el valor umbral de la función de activación de la neurona, en este caso los valores de los pesos pueden fijarse o adaptarse empleando diferentes algoritmos de entrenamiento.

Las funciones AND y OR son ejemplos de problemas de clasificación linealmente separables y por lo tanto pueden ser aprendidas por un perceptrón, en la figura 3.7 se analiza el comportamiento de redes como el perceptrón en un mapa las regiones de decisión creadas en el espacio multidimensional de entradas de la red, para estos dos problemas en estas regiones se visualiza qué patrones pertenecen a una clase y cuáles a otra.

Figura 29. Solución problemas AND y OR.



Fuente: Autores del proyecto

Las entradas del perceptrón diseñado en cada caso para resolver los problemas anteriores corresponden a las dos coordenadas de cada punto, teniendo como salida de la red 1 o 0 dependiendo de si el punto corresponde a una región u otra.

Funcionamiento:

La única neurona de salida del Perceptrón realiza la suma ponderada de las entradas de acuerdo a la ecuación 3.1, resta el umbral y pasa el resultado a una función de transferencia de tipo escalón. La regla de decisión es responder +1 si el patrón presentado pertenece a la clase A, o -1 si el patrón pertenece a la clase B (figura 29), la salida depende de la entrada neta ($n =$ suma de las entradas p_i ponderadas). La red tipo Perceptrón emplea principalmente dos funciones de transferencia, *hardlim* con salidas 1, 0 o *hardlims* con salidas 1, -1; su uso depende del valor de salida que se espera para la red, es decir si la salida de la red es unipolar o bipolar; sin embargo la función *hardlims* es preferida sobre la *hardlim*, ya que el tener un cero multiplicando algunas de los valores resultantes del producto de las entradas por el vector de pesos, ocasiona que estos no se actualicen y que el aprendizaje sea más lento.

Regla de aprendizaje: La regla de aprendizaje fue diseñada y es funcional solamente para un perceptron simple. El Perceptrón es un tipo de red de aprendizaje supervisado, es decir necesita conocer los valores esperados para cada una de las entradas presentadas; su comportamiento está definido por pares de esta forma:

$(P_1, T_1), (P_2, T_2), \dots$ donde P es la entrada y T la salida esperada.

En esencia, el entrenamiento implica un proceso de refuerzo mediante el cual la salida de las neuronas (a) se incrementaba o se decrementaba dependiendo de si las neuronas contribuyen o no a las respuestas correctas del Perceptrón para una entrada dada.

Los pesos se actualizan según la siguiente regla.

Si la respuesta es correcta:

$$w_j(t+1) = w_j(t).$$

Si la respuesta es -1 debiendo ser 1:

$$w_j(t+1) = w_j(t) + X_j.$$

Si la respuesta es 1 debiendo ser -1:

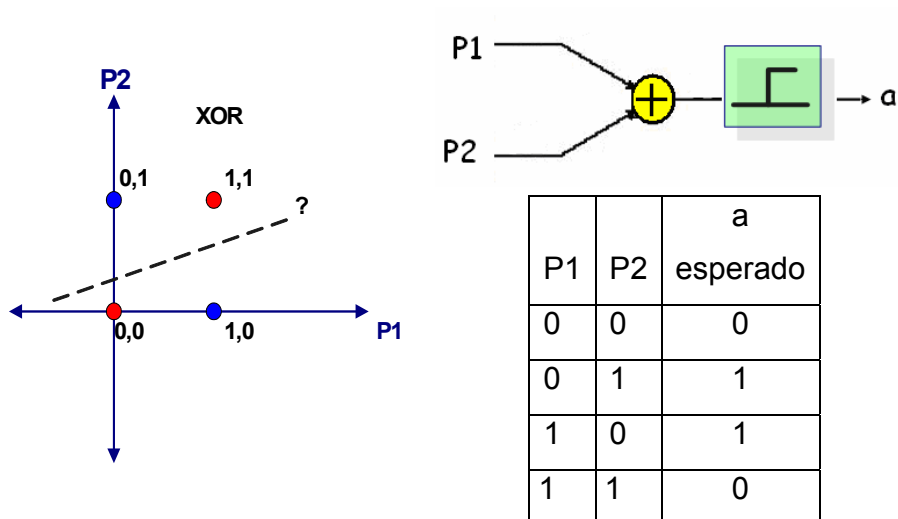
$$w_j(t+1) = w_j(t) - X_j.$$

Esta es la regla de aprendizaje más básica de un perceptrón, pero también pueden utilizarse otras reglas que incluyan parámetros de velocidad de aprendizaje, etc.

Lo realmente importante del perceptrón es que con una regla extremadamente simple es posible separar elementos linealmente.

3.3.2 Perceptrón multicapa. Como ya fue mencionado el perceptrón simple tiene como principal limitante su incapacidad para solucionar problemas que no sean linealmente separables. Como por ejemplo la función XOR (figura 3.8)

Figura 30. Problema XOR



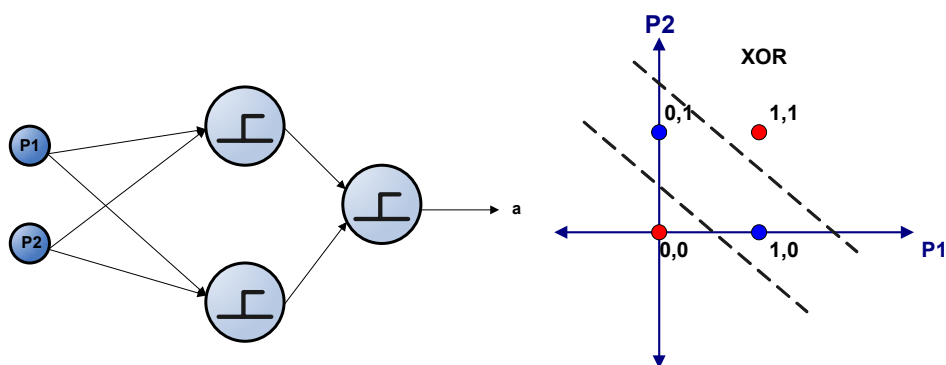
Fuente: Autores del proyecto

Para esta función se pretende que para los valores de entrada 0,0 y 1,1 se devuelva la clase 0 y para los patrones 0,1 y 1, 0 la clase 1. Como puede verse de

la figura 2.1.15 el problema radica en que no existe ninguna línea recta que separe los patrones de una clase de los de la otra puesto que requiere al menos de dos líneas para separar las clases (0 y 1). Debe utilizarse al menos una capa adicional de perceptrones para permitir su aprendizaje.

La solución al problema de clasificación de patrones de la función XOR se encontraría fácilmente si se descompone el espacio en tres regiones: una región pertenecería a una de las clases de salida y las otras dos pertenecen a la segunda clase, así que si en lugar de utilizar únicamente una neurona de salida se utilizaran dos, se obtendrían dos rectas por lo que podrían delimitarse tres zonas; para poder elegir entre una zona u otra de las tres, es necesario utilizar otra capa con una neurona cuyas entradas serán las salidas de las neuronas anteriores; las dos zonas o regiones que contienen los puntos (0,0) y (1,1) se asocian a una salida nula de la red y la zona central se asocia a la salida con valor 1, de esta forma es posible encontrar una solución al problema de la función XOR, por tanto se ha de utilizar una red de tres neuronas (Figura3.9), distribuidas en dos capas para solucionar este problema, lo que constituye un ejemplo sencillo de una red tipo perceptrón multicapa.

Figura 31. Solución Problema XOR.



Fuente: Autores del proyecto

Un Perceptrón multicapa es una red con alimentación hacia delante, compuesta de varias capas de neuronas entre la entrada y la salida de la misma, esta red permite establecer regiones de decisión mucho más complejas que las de dos semiplanos, como lo hace el Perceptrón de un solo nivel.

3.4 BACK PROPAGATION NETWORK (Perceptrón multinivel)

Este modelo es denominado de así debido a su regla de aprendizaje, pero en la literatura se encuentra algunas veces como un tipo de perceptron multicapa, con funciones de transferencia *no lineal y derivable* para poder aplicar la regla de aprendizaje (que para redes multicapa es muy eficiente). Esta red esta compuesta por un conjunto de nodos de entrada que componen la capa de entrada, un conjunto de una o más capas ocultas de neuronas y una capa de neuronas de salida.

A mediados de los años 80 cuando el algoritmo Backpropagation o algoritmo de propagación inversa fue redescubierto al mismo tiempo por varios investigadores, David Rumelhart, Geoffrey Hinton y Ronal Williams, David Parker y Yann Le Cun. La Backpropagation es un tipo de red de aprendizaje supervisado, que emplea un ciclo propagación – adaptación de dos fases. Una vez que se ha aplicado un patrón a la entrada de la red como estímulo, éste se propaga desde la primera capa a través de las capas superiores de la red, hasta generar una salida. La señal de salida se compara con la salida deseada y se calcula una señal de error para cada una de las salidas.

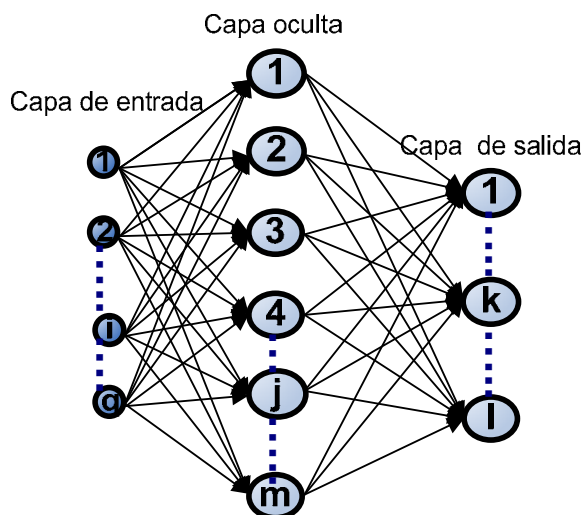
Las salidas de error se propagan hacia atrás, partiendo de la capa de salida, hacia todas las neuronas de la capa oculta que contribuyen directamente a la salida. Sin embargo las neuronas de la capa oculta sólo reciben una fracción de la señal total del error, basándose aproximadamente en la contribución relativa que haya aportado cada neurona a la salida original. Este proceso se repite, capa por capa,

hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido una señal de error que describa su contribución relativa al error total. Basándose en la señal de error percibida, se actualizan los pesos de conexión de cada neurona, para hacer que la red converja hacia un estado que permita clasificar correctamente todos los patrones de entrenamiento.

De todas formas, este comportamiento hace que sea difícil conocer a priori la respuesta de la red. Esto se debe a dos motivos, el comportamiento no lineal de las neuronas, las cuales están muy interconectadas, (lo que hace difícil un análisis teórico de la red) y la existencia de neuronas ocultas, que impide poder “ver” como se produce el aprendizaje y determinar cuales son las características que mejorarían el aprendizaje.

El proceso de ajuste de los pesos, por ejemplo para una red con una sola capa oculta se hace de acuerdo a las siguientes ecuaciones y a la red de la figura 32.

Figura 32. Esquema general de una RNA multicapa.



Fuente: Autores del proyecto

q : equivale al número de componentes el vector de entrada.

m : número de neuronas de la capa oculta

l : número de neuronas de la capa de salida

Para las neuronas de la capa de salida:

$$W_{kj}(t+1) = W_{kj}(t) - 2\alpha\delta_k^s \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$b_k(t+1) = b_k(t) - 2\alpha\delta_k^s \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Para las neuronas de la capa oculta:

$$W_{ji}(t+1) = W_{ji}(t) - 2\alpha\delta_j^0 \quad \text{Ecuación 3.4}$$

$$b_j(t+1) = b_j(t) - 2\alpha\delta_j^0 \quad \text{Ecuación 3.5}$$

$$\delta_k^s = (t_k - a_k^s) f'(n_k^s) \quad \text{Ecuación 3.6}$$

$$\delta_j^0 = f'(n_j^s) * \sum_{k=1}^1 \delta_k^s w_{kj}^s \quad \text{Ecuación 3.7}$$

$$n_j^0 = \sum_{i=1}^1 W_{ji}^0 P_i + b_j^0 \quad \text{Ecuación 3.8}$$

w_{ij} = Peso que une la componente i de la entrada con la neurona j de primera capa oculta o de salida

P_i = Componente i del vector p que contiene el patrón de entrenamiento de que componentes. El superíndice (0 ó s) representa la capa a la que pertenece cada parámetro, 0 capa oculta y S capa de salida.

b = se le conoce como ganancia, y se trata de un término independiente para realizar una mejor diferenciación en las regiones de clasificación de patrones

f = Función de transferencia de las neuronas

f' = Derivada de la Función de transferencia de las neuronas

n = entrada neta (Neta)

α = Rata de aprendizaje que varía entre 0 y 1 dependiendo de las características el problema a solucionar

Las derivadas de las principales funciones de transferencia son:

➤ Logsig: $f'(n) = f(n)(1 - f(n))$ $f'(n) = a(1 - a)$

➤ Tangsig: $f'(n) = 1 - (f(n))^2$ $f'(n) = (1 - a^2)$

➤ Purelin $f'(n) = 1$

Existen algunas modificaciones a este algoritmo en los cuales se involucran diferentes parámetros, que en unos casos mejoran el proceso de convergencia del aprendizaje y en otros pueden complicarlo.

3.4.1 Aplicaciones de Backpropagation. El hecho de que las redes multicapa se apliquen para resolver con éxito multitud de problemas se debe a la utilización del algoritmo de aprendizaje que actualmente está más extendido, el algoritmo o regla backpropagation, el cual es una generalización de la regla LMS “Least Mean Square”, por lo tanto también se basa en la corrección del error.

Las redes neuronales artificiales backpropagation o redes multicapa que asumen este algoritmo de entrenamiento, hacen posible el entrenamiento de redes multicapa, además de permitir el uso de diferentes funciones de transferencia a través de las capas, lo cual habilita a la red para aplicarse en diferentes campos como ingeniería eléctrica, robótica, estadística, química analítica, ingeniería de petróleos, ingeniería de procesos, entre otras.

Dentro de las tareas en las cuales este tipo de redes neuronales son aplicadas una de las más importantes y que además concierne a este trabajo es la de reconocimiento de patrones. El reconocimiento de patrones trata de los medios

por los cuales se puede interpretar el mundo. Es la ciencia que se ocupa de los procesos sobre ingeniería, computación y matemáticas relacionados con objetos físicos y/o abstractos, con el propósito de extraer información que permita establecer propiedades de o entre conjuntos de dichos objetos. Este tipo de tarea se involucra en la mayoría de los procesos industriales y operativos, como el caso concreto de nuestro problema sobre identificación de problemas del equipo de subsuelo de una unidad de bombeo mecánico. Los pasos y proceso de desarrollo de proyectos similares se deben desarrollar de acuerdo a lo que de aquí en adelante en este estudio se describe.

3.5 APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES A LA INGENIERIA DE PETROLEOS:

La industria de la exploración, explotación y producción de petróleo y gas no es ajena a la tendencia de la utilización de redes neuronales artificiales como una nueva alternativa de dar solución a problemas que se pueden presentar en esta industria. En varios artículos Mohaghegh⁴⁵ hace un recuento de las aplicaciones de las redes neuronales artificiales en al industria del petróleo y gas. Estas aplicaciones están basadas en la capacidad de estas para resolver problemas combinados con herramientas convencionales tales como el análisis estadístico e inferencia de patrones de datos.

Mohaghegh, kumoluyi A.O. y Daltaban T.S. proponen la aplicación de las redes neuronales artificiales de alto orden, redes de retropropagacion: perceptrones multicapa, redes de teoría de resonancia magnética, maquinas de Boltzmann y mapas de auto-organizativos de Kohonen a casos específicos de análisis de datos; interpretación de registros de pozo, modelamiento del flujo multifásico en tubería y tratamiento de datos sísmicos. Para estos casos se busca explotar la

⁴ Mohaghegh S. and Ameri S. "Artificial Neural Network as a Valuable Tool for Petroleum Engineers". SPE 29220.(1995)

⁵ Mohaghegh S. "Neural Network: what it can do for Petroleum Engineers". SPE 29219 (1995).

propiedad de las redes neuronales de alto orden para efectuar un reconocimiento de patrones que permite efectuar una selección de los datos para un análisis estadístico posterior.

Ali J.K.⁶ muestra el panorama de las aplicaciones directas de las redes neuronales artificiales en la industria del petróleo. Estas aplicaciones aunque novedosas no son necesariamente el resultado de una aproximación al azar. Las empresas de petróleo y gas tratan de aumentar su posicionamiento global mejorando las predicciones de mercado y el tratamiento de la compleja información generada en el proceso de exploración y explotación de campos de petróleo y gas.

Las características de las redes neuronales artificiales se aplican a los siguientes casos:

- Problemas en los cuales se desconocen reglas detalladas para resolverlos o son difíciles de formalizar, pero hay conjuntos de datos de entrada y salida conocidos.
- Problemas que tienen RUIDO en los datos.
- En los que se requiere una alta velocidad de procesamiento.

Ali J.K. resume en su artículo las aplicaciones directas de las redes neuronales artificiales a la industria del petróleo de la siguiente manera:

Geología y geofísica:

- Estimación de reservas.
- Identificación de minerales en los registros de pozos.
- Localización de pozos a perforar en datos geofísicos.
- Comprensión de los datos sismogramas en la prospección petrolífera.

⁶ Ali J.K. "Neural Networks: A New Tool for the Petroleum Industry?". SPE 27561. (1994)

Perforación y completamiento de pozos:

- Análisis de datos de perforación.
- Diagnostico de desgaste de brocas
- Selección y monitoreo de brocas y lodos de perforación.

Evaluación de formaciones:

- Predicción de la porosidad.
- Predicción de la permeabilidad.
- Detección y delineamiento de fracturas.
- Identificación e interpretación de registros.
- Presiones de poro.

Producción y facilidades:

- Análisis y diagnostico de problemas en la bomba de subsuelo del equipo de bombeo mecánico mediante dinagramas.
- Análisis e implementación de producciones de gas y petróleo.
- Inspección de tuberías de producción.
- Diagnostico y mantenimiento.
- Localización de plataformas de perforación costa afuera.

Ingeniería de yacimientos:

- Análisis de parámetros de producción de gas y petróleo.
- Inversión de modelos de simulación.
- Ajuste histórico automático
- Reconocimiento de patrones de presión en pruebas de pozo
- Predicción de propiedades de yacimiento.
- Predicción de propiedades físicas

Negocios del petróleo:

- Análisis de mercadeo de gas y petróleo.
- Análisis de riesgo
- Optimización de portafolio de negocios
- Coordinación de datos económicos

En estudios posteriores se ha profundizado en la utilización de las redes neuronales en el campo de caracterización de propiedades de yacimiento, creando algoritmos para analizar los registros o perfiles eléctricos de pozo para estimar con una mayor exactitud las propiedades de los fluidos en la litología y columna estratigráfica del pozo.

4. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACION DE PROBLEMAS EN EL EQUIPO DE SUBSUELO POR MEDIO DE REDES NEURONALES.

Utilizando métodos de investigación aplicada, se estudió todo lo concerniente al sistema de levantamiento artificial por bombeo mecánico, para tener un conocimiento más amplio sobre este sistema, luego, toda atención se enfocó específicamente en bomba de subsuelo.

Teniendo conocimiento previo sobre este sistema de levantamiento artificial, toda la atención se concentró en el dinamómetro, el cual es una herramienta que sirve para evaluar el funcionamiento de la bomba midiendo directamente las cargas instantáneas que soporta la barra lisa en función del desplazamiento del pistón de la bomba; estas cargas se registran sobre una tarjeta, describiendo una curva cerrada denominada dinagrama. Las cartas dinamométricas se tomaron del software TWM (Total Well Management) Echometer, evaluando la carta de fondo para hacer el análisis del funcionamiento de la bomba de subsuelo. Esta tarjeta o carta llamada dinagrama da una idea de las condiciones en que se encuentra operando la bomba. Para poder entender estas cartas tradicionalmente se hace un análisis cualitativo basado en diversas formas o comportamientos preestablecidos que representan la situación de la bomba de subsuelo.

De acuerdo a la información adquirida sobre la interpretación de dinagramas y con base el comportamiento que describe la forma de las cartas, el procedimiento para aplicar una red neuronal artificial a la identificación de problemas en el equipo de subsuelo se explicará en detalle en el transcurso de este capítulo, se describe la metodología desarrollada y los parámetros más importantes de esta aplicación. Para esto se plantea inicialmente las pautas a seguir para el desarrollo de un proyecto Neurocomputacional y luego se especifica paso a paso el procedimiento a seguir.

4.1 PROYECTO NEUROCOMPUTACIONAL.

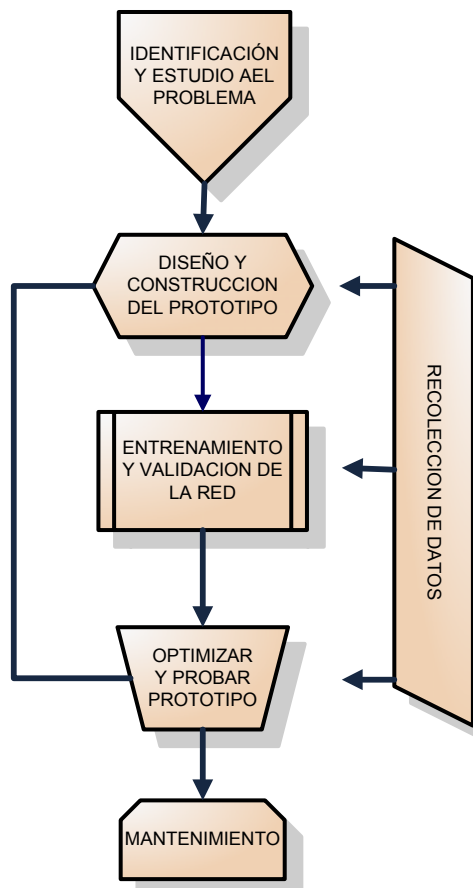
Cuando se habla de un proyecto Neurocomputacional se refiere al tipo de proyectos que vinculan técnicas de inteligencia artificial como las *Redes Neuronales* y los Algoritmos Evolutivos, estas técnicas tienen aplicación en diversas áreas de acuerdo a la su flexibilidad y funcionalidad. Particularmente las redes neuronales se han implementado exitosamente en la ingeniería de petróleos y en varias aplicaciones entre las cuales se encuentran las áreas de producción, yacimientos y perforación.

4.1.1 Fases de un proyecto Neurocomputacional. Al decidir solucionar este problema de una manera diferente a la tradicional y utilizar una de las técnicas mas importantes en el desarrollo de la Inteligencia Artificial (IA) como lo son las Redes Neuronales Artificiales (RNA), es necesario visualizar el escenario y la manera correcta como se debe ejecutar un proyecto que se realiza en este nuevo campo y aclarar las etapas o fases de desarrollo para este, concretamente en lo referente a redes neuronales artificiales.

La Neurocomputación es la rama de la Inteligencia Artificial que basa su funcionamiento en la emulación de procesos biológicos. Sus herramientas principales son las *Redes Neuronales* y los Algoritmos Evolutivos. Por tal motivo, los Sistemas Inteligentes basados en Neurocomputación se caracterizan por su capacidad de adaptación al entorno de información facilitando de esta manera la resolución de problemas complejos. Su aplicación en diversas áreas ha demostrado ser exitosa y específicamente dentro del campo de acción de este proyecto. Es por estas razones que es necesario fijar y aplicar una ruta específica que asegure el éxito del proyecto, ruta que en ésta sección se aclarara a modo de fases de desarrollo.

Para el diseño y planeación de este proyecto de Neurocomputación se utiliza una metodología general, esta metodología permite obtener un lineamiento guía en su desarrollo y promueve un esquema de trabajo ordenado con elementos importantes para tener éxito. De forma esquemática una descripción general de las etapas en la vida de un proyecto de Neurocomputación con redes neuronales para la solución de un problema es la siguiente:

Figura 33. Ciclo de vida de un proyecto que utiliza Neurocomputación.



Fuente: Autores del proyecto

En lo siguiente de esta sección se explicará lo que involucra cada una de las fases de desarrollo y se explicará como se superó cada etapa además de otros aspectos importantes del presente proyecto.

4.1.1.1. Identificar si el problema es adecuado para intentar resolverlo utilizando Redes Neuronales. En el caso del diagnóstico de problemas en el equipo de subsuelo de unidades de bombeo mecánico las técnicas tradicionales hablan concretamente de la interpretación y análisis de dinagramas, cartas que muestran graficas de carga vs. posición sobre y del pistón respectivamente, esta tarea se basa en la identificación de formas o comportamientos que pueden y han sido preestablecidas para determinados problemas y dependiendo de si estas formas patrón están implícitas en el dinagrama de fondo o no, el equipo de subsuelo presenta el problema relacionado con dicha forma patrón o se encuentra funcionando normalmente.

De esta forma se describe nuestro problema en una tarea de reconocimiento de patrones y clasificación de los dinagramas en base a un conjunto de datos de un dinagrama, ejercicio que se puede desarrollar utilizando como herramienta una red neuronal artificial como se describe en el capítulo 2.

Específicamente esta tarea puede ser realizada por redes tipo perceptron multicapa, como se explica de forma didáctica e inductiva en el capítulo anterior con ejemplos similares muy sencillos como el AND, OR y el XOR. En el capítulo mencionado los dos primeros problemas son solucionados con redes tipo perceptron simple y la solución del XOR, un ejemplo mas complejo, demuestra que al aumentar el número de neuronas y el número de capas (sección 3.3.2.) es posible obtener resultados óptimos en problemas de reconocimiento y clasificación complejos.

Diversos estudios en la temática han mostrado que el proceso de entrenamiento y ajuste de una red neuronal que realice éste trabajo es factible. La forma de cumplir este objetivo es realizar un análisis de los patrones de entrenamiento que luego se le enseñaran a la red, así como de los datos necesarios de cada dinagrama de entrenamiento para asegurar un reconocimiento e identificaron de problemas con error mínimo. Por lo tanto el esfuerzo más grande se debe concentrar en construir una base de datos de entrenamiento con ejemplos óptimos en cuanto a definición de los problemas y extraer cada uno de los aspectos más relevantes que caractericen cada situación. Además es fundamental en este tipo de proyectos la utilización de una topología neuronal adecuada que permita cumplir los dos objetivos (reconocimiento y clasificación de los datos del dinagrama de entrada a la red) y también la utilización de funciones de transferencia adecuadas que son un punto clave en el ajuste de la red y en la forma en que esta presente resultados.

4.1.12 Diseño y construcción de un prototipo que ofrezca soluciones al problema. En esta etapa se define la arquitectura de la red, el tipo de algoritmo de entrenamiento, el tipo de pre-procesamiento y/o codificación de los datos de entrenamiento y además se determina con que información se entrenará a la red.

4.1.1.3. Entrenamiento de la red y validación. En este proceso se le muestra a la red un grupo de datos de entrada y salida para que identifique las características de los mismos y permita predecir nuevos resultados de las diferentes variables de entrada.

El conjunto de patrones de entrenamiento es el pilar fundamental de cualquier proyecto Neurocomputacional ya que de estos esta compuesto las reglas de aprendizaje de la red neuronal artificial. Para asegurar una base de patrones de entrenamiento optima es necesario principalmente que sus datos contengan un mínimo de ruido asociado (esto depende del problema a resolver) y que cada

patrón este plenamente estudiado y analizado con el fin de que la información se traduzca en proposiciones e ideas claras y específicas que equivaldrán a los patrones o reglas a ser aprendidas por la RNA y que se traducen en salidas concretas de cada una de las neuronas de la última capa.

4.1.1.4 Probar y optimizar el prototipo. En esta fase se determina si se debe modificar la arquitectura de la red, si se requieren más datos de entrenamiento o si es necesario cambiar el modelo original incluyendo el algoritmo de entrenamiento (se pone a prueba el diseño y se mejora en caso de ser necesario).

En la optimización se debe regresar a los pasos 2 y 3; y volver a la fase de prueba una vez realizada alguna modificación. El prototipo se convierte en el modelo óptimo cuando el sistema sea confiable, es decir que produzca las soluciones requeridas en la fase de prueba. Para cubrir este aspecto se deben ejecutar diferentes pruebas entre las cuales se deben evaluar las entradas de la red, las salidas y las diferentes arquitecturas (variando principalmente el número de capas ocultas y el número de neuronas en cada capa oculta).

4.1.1.5 Fase de mantenimiento. Se debe realizar continuamente después de que se ha construido el sistema. Aquí se trata de aprovechar al máximo las facilidades que ofrecen los Software, corrigiendo errores y analizando mejoras en todos los sentidos, desde la base de patrones de entrenamiento, los dinagramas prueba, tratamiento de la información, presentación de los resultados, visualización del error, etc.

4.1.1.6 Recolección de la información. Este aspecto es uno de los más importantes, la información puede ser requerida en cada fase del desarrollo del proyecto.

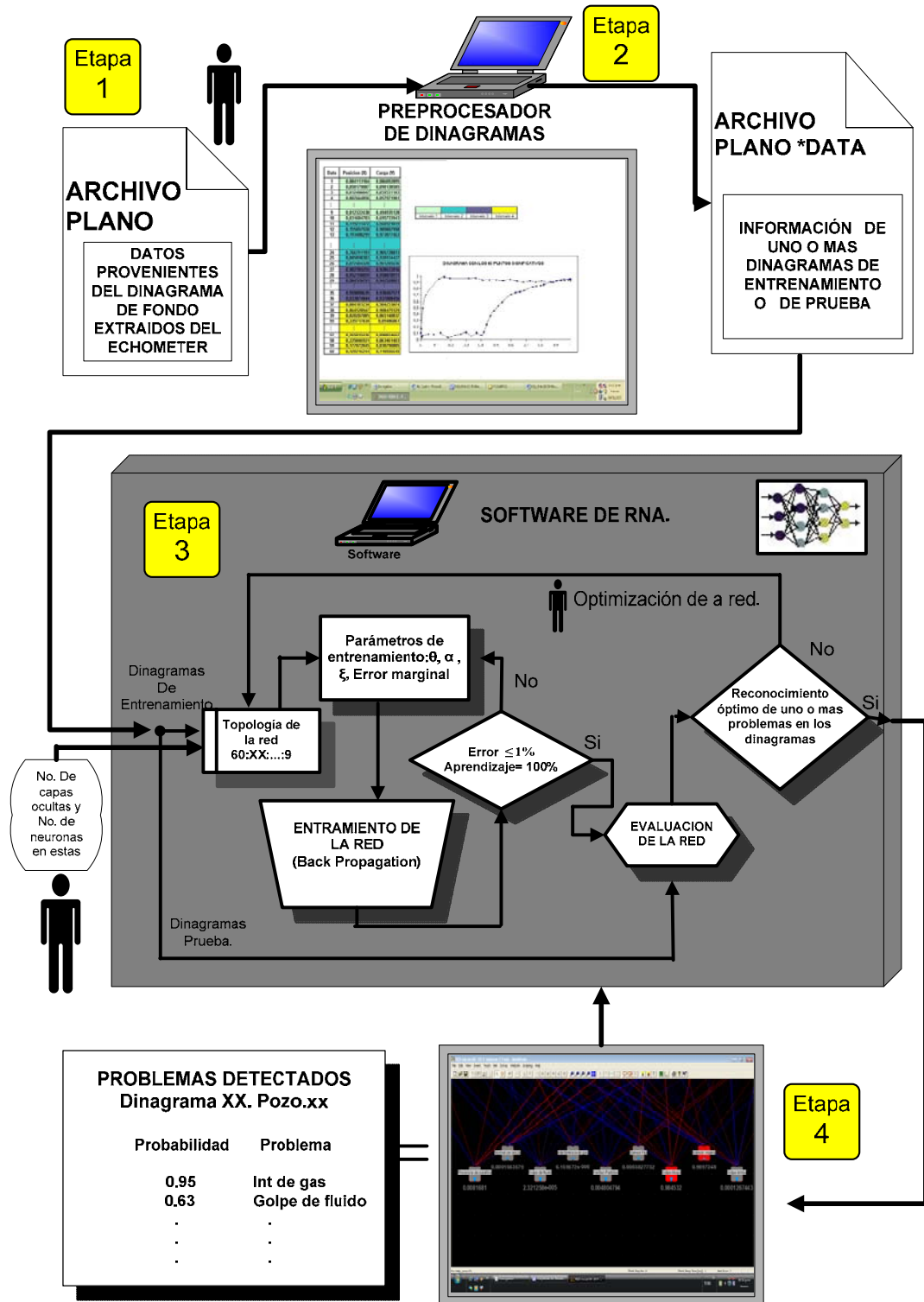
4.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

De manera consecuente con las fases de desarrollo de un proyecto neurocomputacional y acorde con las ventajas y posibilidades que presentan las redes neuronales en esta aplicación, se propuso que la red neuronal desarrollada debe identificar problemas presentes en el equipo de subsuelo de la unidad de bombeo mecánico a partir de 60 puntos que representen el comportamiento del dinagrama. (K. Ashenayi, G.A. Nazi, J.F. Lea, y F. Kemp. SPE 25420) y que la expresión de identificación de uno o varios problemas por parte de la red se asocia a valores entre cero (0) y uno (1) que indican el grado o probabilidad de ocurrencia del problema.

Con este planteamiento se establece que la red neuronal a ser utilizada en esta aplicación debe contener 60 elementos de entrada que corresponden a los 60 puntos significativos extraídos y representativos de cada diagrama, y que cada elemento o neurona de salida corresponde a un problema o situación en el equipo de subsuelo de las unidades de bombeo mecánico a ser identificado por la RNA, de tal forma que número de neuronas de salida = número de situaciones a identificar.

Acorde al planteamiento anterior y con base en los conceptos y principios de un proyecto neurocomputacional, se desarrolló una metodología que está compuesta de un total de 4 etapas, las cuales tienen como fin aportar en la solución de las dudas o requerimientos de esta aplicación y establecer un procedimiento riguroso para obtener buenos resultados. Al concluir este proceso, se habrá comprendido el procedimiento seguido por este trabajo para predecir los diferentes problemas en la bomba de subsuelo del equipo de bombeo mecánico utilizando redes neuronales. Para entender el procedimiento realizado de manera sencilla en la ejecución de nuestro estudio puede observarse de manera esquemática la siguiente figura.

Figura 34. Metodología de trabajo.



Fuente: Autores del proyecto

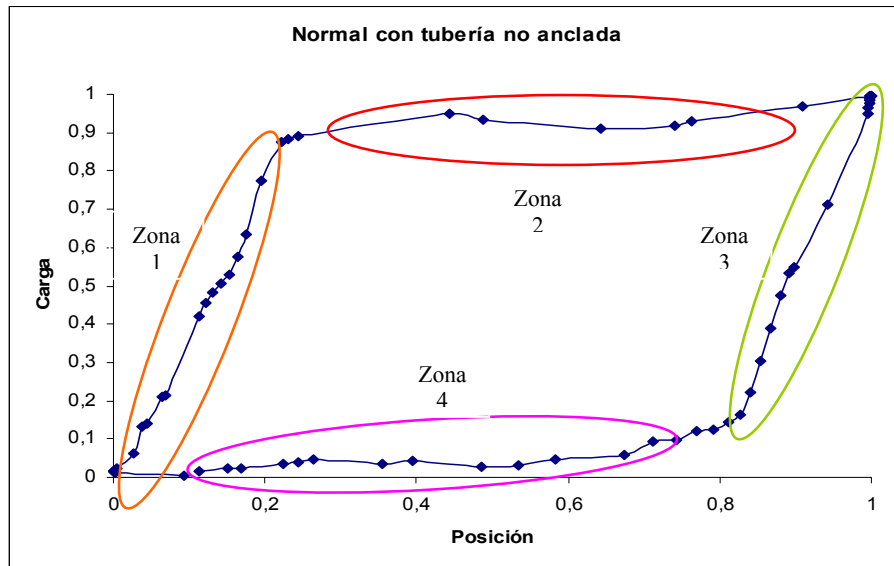
Lo siguiente es una breve descripción y aclaración de los aspectos y elementos de la metodología de trabajo.

4.2.1 Etapa 1. En ésta etapa se debe recolectar, establecer y organizar la información necesaria requerida sobre cada dinagrama, establecidas de acuerdo a las entradas y salidas de la red. Además se debe disponer la información de interpretación de cada dinagrama de acuerdo a la forma como se espera que la red identifique los problemas.

4.2.1.1 Puntos significativos del Dinagrama. La información sobre los puntos escogidos sobre cada dinagrama es de vital importancia para cada una de las siguientes etapas, y es por esto que en este punto se debe establecer la cantidad de los puntos significativos. La siguiente es una explicación de porque la extracción de 60 puntos significativos sobre cada carta dinamométrica.

Para efectuar un buen estudio de los dinagramas se consultaron varios métodos de análisis y selección de patrones para que cada registro pudiera ser reconocido por la red. En la selección se evaluaron varios métodos publicados en la SPE (Papers 84140, 17313, 36605, 25420) y se seleccionó de acuerdo a su sencillez y resultados obtenidos el método seguido por el paper SPE 25420, en el cual el dinagrama se divide en dos intervalos, carrera ascendente y su carrera descendente, además con el fin de efectuar un mejor análisis de lo que esta sucediendo en la bomba de subsuelo y analizar posibles situaciones problema al final de las carreras ascendente y descendentes, estas regiones a su vez se dividieron en otros dos intervalos obteniendo así una descripción mas detallada del funcionamiento de la bomba, con un total de 4 regiones en la carta dinamométrica. Cada una de estas regiones se pueden observar en la siguiente figura.

Figura 35. Regiones en las que fue dividido el dinagrama



Fuente: Autores del proyecto

De cada carta fueron escogidos 60 puntos (puntos significativos), los cuales fueron distribuidos dependiendo de la región o intervalo donde se presenten más cambios en la forma del dinagrama, esto basado en los aportes hechos en la investigación de K. Ashenayi, G.A. Nazi y J.F. Lea⁷ en el reconocimiento de patrones. Cabe mencionar que esta distribución de puntos no es obligatoria, por lo que se puede realizar otra selección con la cantidad de puntos y la ubicación de estos como se desee en estudios posteriores, recordando que el objetivo radica en que esos puntos deben representar muy bien la forma de el dinagrama.

4.2.1.2 Interpretación de los dinagramas. En este proyecto se busca que la red neuronal sea capaz de identificar los problemas presentes en el equipo de subsuelo de la unidad de bombeo mecánico es decir que la red permita identificar si es el caso, más de un problema y que este reconocimiento este ligado a un

⁷ K. Ashenayi, G.A. Nazi y J.F. Lea. "Application of an Artificial Neural Network to Pump Card Diagnosis. SPE 25420 (1994)

numero que represente el grado o probabilidad de que el dinagrama analizado se asemeje a uno o más de los dinagramas patrón de determinado problema. Teniendo en cuenta que una manera sencilla de expresar una probabilidad es asociarla con valores entre cero (0) y uno (1), y que la red debe identificar cada problema por separado asociándolo con una probabilidad de ocurrencia de la situación problema, es necesario que cada neurona de salida representa un problema a reconocer por la red y que la información en esta etapa de cada dinagrama este completa en cuanto a su interpretación descrita con un valor entre cero y uno.

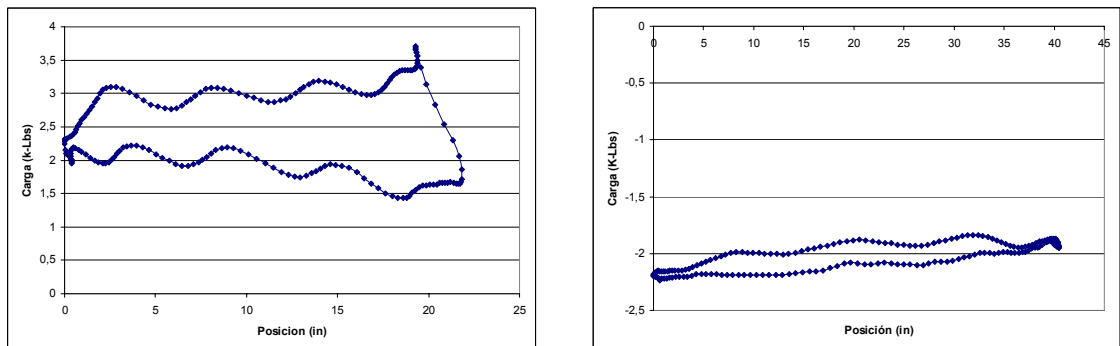
4.2.1.3 Patrones de entrenamiento, prueba y predicción. Con el fin de realizar un procedimiento organizado, en esta etapa se deben establecer los dinagramas a ser usados en las fases de entrenamiento, prueba y predicción, de tal forma que al procesar estos se tenga una idea clara de sus destinos y la elaboración de los formatos de entrada a la red sea exitosa.

Para comenzar una prueba en este trabajo el primer paso es adquirir los datos del dinagrama de fondo del pozo a ser analizado, estos datos son coordenadas tipo (x, y) que corresponden a las coordenadas de posición del pistón y carga soportada por la primera varilla después de la bomba respectivamente. Los datos de los dinagramas de fondo son extraídos directamente del “Echometer” y guardados separadamente en archivos planos (tipo block de notas) para su posterior pre-procesamiento individual. Los principios y descripción del pre-procesamiento de los dinagramas se explican en la siguiente etapa, y posteriormente estos son ejecutados por un software diseñado y construido para este fin.

4.2.2 Etapa 2. En esta etapa se explican los principios y procesos necesarios para adecuar la información de cada dinagrama y disponerla para el software de redes neuronales artificiales.

4.2.2.1. Normalización de datos. Las cargas máximas, mínimas y la longitud del stroke registradas en cada carta Dinamométrica dependen de varios factores específicos de cada pozo en el que se toma el registro, entre los factores más importantes se encuentran la profundidad de la bomba, el diámetro del pistón El tipo de crudo, la cantidad de gas producido y la gravedad específica del agua de formación. Dos ejemplos sencillos de registros de un dinagrama pueden observarse en la figura 36, en los que se aprecia la diferencia en escalas de dos registros dinamométricos permite dar una idea la variabilidad de los rangos que pueden existir.

Figura 36. Dinagramas sin normalizar



Fuente: Autores del proyecto

Si comparamos a simple vista no podemos hallar ningún punto en común dadas sus formas, ni mucho menos establecer similitudes y diferencias entre las cartas dinamométricas por región, es decir que no es posible realizar una comparación cuantitativa de los dinagramas y por lo tanto tampoco un análisis cuantitativo de estos.

La normalización es un proceso que nos permite ajustar los datos para que trabajen todos a una misma escala y así poder regularizarlos o estandarizarlos.

Esto es necesario para que se puedan correlacionar mejor y consiste en agrupar los valores en el rango entre cero y uno en cada eje coordenado, empleando para este fin las siguientes ecuaciones:

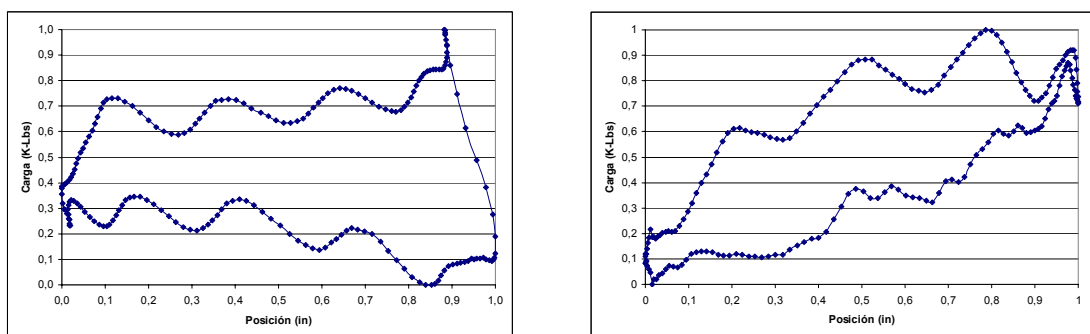
$$X_{nor} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} ; \quad Y_{nor} = \frac{Y - Y_{min}}{Y_{max} - Y_{min}}$$

Donde:

X_{nor} y Y_{nor} representan los valores normalizados de las variables de entrada.

Ahora se puede observar los mismos dinagramas antes mostrados pero ahora normalizados. Figura 37.

Figura 37. Dinagramas normalizados



Fuente: Autores del proyecto

Teniendo los dinagramas en una misma escala la comparación entre ellos se hace mucho más fácil para su estudio, y facilita el reconocimiento para la red.

4.2.2.2 Metodología utilizada en la selección de puntos significativos. Para seleccionar los puntos significativos por registro, se consultaron diferentes métodos de análisis y extracción. El proceso de selección de puntos comienza una vez normalizado el dinagrama, el dinagrama se divide en dos intervalos, carrera

ascendente y su carrera descendente, todo esto con el fin de efectuar un mejor análisis de lo que esta sucediendo en la bomba de subsuelo, estos a su vez se subdividieron en otros dos intervalos para lograr así una descripción mas detallada del funcionamiento de la bomba , obteniendo al final, un total de 4 regiones en la carta dinamométrica como fue señalado anteriormente.

De cada carta fueron escogidos 60 puntos los cuales fueron distribuidos dependiendo de la región o intervalo donde se presenten más cambios en la forma del dinagrama, de acuerdo con los aportes hechos por K. Ashenayi, G.A. Nazi y J.F. Lea⁸ en el reconocimiento de patrones. Establecido el número de puntos a extraer de cada dinagrama es necesario describir la técnica utilizada para extraer solo los puntos más significativos que caractericen a cada carta dinamométrica. De acuerdo a las metodologías consultadas existe una que sirve como guía en este proceso, y fue planteada por Lideniro Alegre⁹, C.K. Morooka'and A.F. da Rocha, estos investigadores, plantearon este aspecto sobre la extracción de puntos significativos como el proceso inicial de reconocimiento de patrones con el cual se caracteriza cada dinagrama, ellos describen el principio de selección, pero lo aplican con una técnica de inteligencia artificial denominada "neuro-fuzzy", la cual combina redes neuronales y lógica difusa o borrosa, técnica que no utilizaremos por su complejidad.

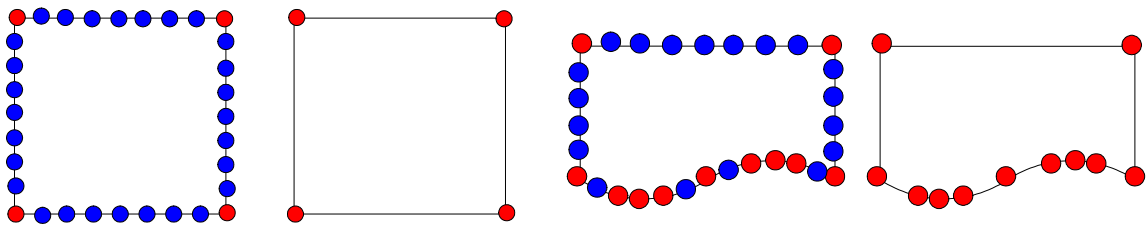
El principio bajo el cual se realiza el proceso de selección tiene que ver como el problema lo sugiere con la forma de las cartas dinamométricas. Un punto pertenece a un punto significativo de un dinagrama cuando un cambio importante de dirección de la trayectoria carga vs. ciclo tiene lugar (figura 37). Como ejemplo sencillo podemos presentar una figura geométrica delineada por una serie de puntos consecutivos y resaltando en esta cuales puntos pertenecen a puntos

⁸ K. Ashenayi, G.A. Nazi y J.F. Lea. "Application of an Artificial Neural Network to Pump Card Diagnosis. SPE 25420 (1994)

⁹ Lideniro Alegre, * PetrobrAs S.A., and C.K. Morooka'and A,F. da Rocha, State U. of Campinas. SPE 26516

significativos en la figura 38. De acuerdo a esto podemos observar que para una figura tan sencilla como un cuadrado el numero de puntos significativos necesarios para representar un cuadrado es cuatro y también podemos concluir que mientras más compleja y más irregular sea la figura se necesitan más puntos significativos, pero repetimos que para nuestro problema fue necesario delimitar el numero de puntos significativos antes de la extracción.

Figura 38. Puntos significativos de un cuadrado y una figura irregular.



La selección de los puntos se realiza con base en el cambio de dirección y la forma de determinar si un cambio de dirección es considerable, el procedimiento aplicado es el siguiente:

1. Teniendo en cuenta que disponemos de un gran número de puntos consecutivos de coordenadas tipo X,Y se determina la pendiente entre las rectas de cada dos puntos consecutivos.

$$pendiente = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \quad (XX)$$

2. El valor de la pendiente nos proporciona información acerca de la dirección de la recta que une los puntos dependiendo de la magnitud y de si la pendiente es positiva o negativa.

3. Teniendo información de la dirección de las rectas que unen cada dos puntos, el siguiente paso es determinar la variación entre la dirección, variación que es determinada por el valor absoluto de la diferencia entre dos pendientes consecutivas.

$$\text{Variación de la Dirección} = |\text{Pendiente1} - \text{Pendiente 2}| \quad (\text{XX})$$

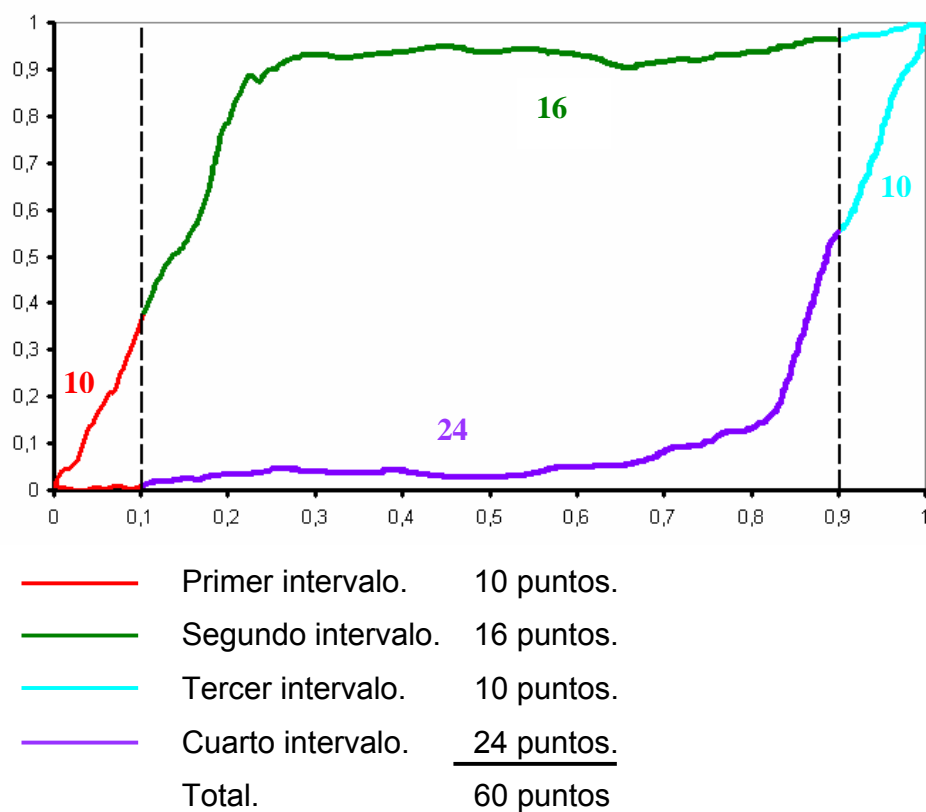
:

4. Teniendo en cuenta esta variación se extraen los puntos significativos PS de acuerdo a los intervalos señalados así:
 - 10 puntos en el intervalo de la posición de 0.1 @ 0.0 y de 0.0 @ 0.1(carrera ascendente).
 - 16 puntos en el intervalo de posición de 0.1 @ 0.9 (carrera ascendente).
 - 10 puntos en el intervalo de posición 0.9 @ 1 y de 1 @ 0.9 (carrera descendente).
 - 24 puntos en el intervalo de posición de 0.9 @ 0.1 (carrera descendente).

Se escogió la mayor cantidad de puntos en el intervalo (4) debido a que en esta zona es donde se presenta la mayor variación en la forma del dinagrama (mirar formas más comunes de dinagramas. Capítulo 2).

Hay que tener en cuenta que este proceso de selección de puntos se hace con el dinagrama de fondo y con los datos ya normalizados del dinagrama. En La siguiente figura se muestra los intervalos y la cantidad de puntos que aportara cada uno de los intervalos.

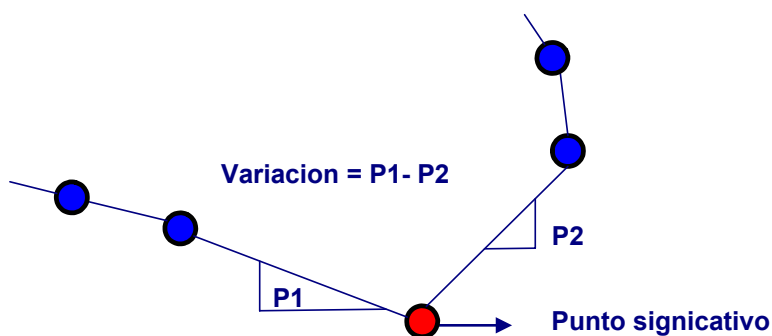
Figura 39. Dinagrama con puntos por intervalo.



Fuente: Autores del proyecto

Es importante aclarar dos aspectos; primero que la magnitud de la variación indica si hay un cambio importante de dirección entre dos rectas y segundo que el punto significativo a seleccionar es el punto que tienen en común las dos rectas involucradas en este cambio de dirección como se muestra gráficamente en la siguiente figura.

Figura 40. Explicación grafica de selección de un punto significativo



Fuente: Autores del proyecto

Al implementar el procedimiento surgió un problema relacionado con la cantidad de puntos provenientes del "Echometer" con el cual se agrupan los PS en la zona donde existen una cantidad considerable de variaciones de dirección que agotan el numero de puntos significativos sobre otras áreas del dinagrama también importantes, y con la existencia de ruido considerable asociado a los datos, la conclusión para solucionar este problema logrando una distribución correcta de los puntos significativos, fue evaluar cambios de dirección sin tener en cuenta la pendiente inmediatamente anterior involucrada en la variación antes calculada en el paso anterior, es decir que cada variación no involucra pendientes en común con otra variación medida (Tabla 6).

Tabla 6. Explicación de la hoja de cálculo para selección de puntos significativos.

	Coordenada X	Coordenada Y	Pendientes	Variación entre pendientes = Variación de dirección
Punto 1	X1	Y1	P1	V1
Punto 2	X2	Y2		
Punto 3	X3	Y3	P2	
.	.	.	.	
.	.	.	.	
.	.	.	.	
.	.	.	.	
.	.	.	.	

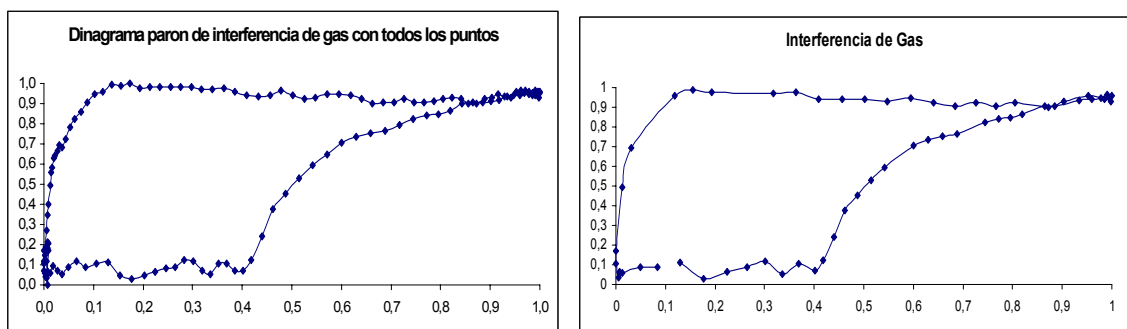
	Punto significativo seleccionado		Variación de dirección de magnitud considerable
--	----------------------------------	--	---

Fuente: Autores del proyecto

El procedimiento descrito anteriormente fue realizado inicialmente en una hoja de cálculo de Microsoft Excel utilizando herramientas que brinda este sistema como cálculo de operaciones matemáticas para la normalización de los datos, cálculo de pendientes y variaciones; funciones lógicas para clasificación de los datos por regiones o intervalos e identificación de las variaciones de dirección más representativas y herramientas gráficas para visualización de los resultados. El procedimiento plasmado en la hoja de cálculo requiere de la intervención de una persona que entienda el proceso para realizar la extracción de puntos en una lista diferente y ajustar el número de puntos por región o intervalo, lo que hace de este procedimiento algo tedioso y que además consume tiempo considerable. Para solucionar este inconveniente y con el fin de automatizar este procedimiento, se diseñó y elaboró un software el cual es llamado “Preprocesador de Dinagramas”.

Luego de todo este proceso, los datos son organizados para construir una nueva carta dinamométrica esta vez ya con solo 60 puntos que luego será comparada con la carta original para determinar si la nueva carta es una muestra representativa de la carta original; después de esto, los datos quedan listos para ser cargados a la red.

Figura 41. Graficas de un dinagrama con todos los puntos y únicamente con los puntos significativos seleccionados.



Fuente: Autores del proyecto

Para poder procesar los datos de los dinagramas, se diseñó un software sencillo capaz de realizar la tarea y las implicaciones pertinentes sobre la elaboración de formatos de salida, el software es llamado por nosotros "Preprocesador de dinagramas". Este Software ejecuta tareas como cambio de formato de los datos del Echometer, normalización de datos, selección y extracción de puntos significativos de acuerdo a la metodología, generación de formatos de entrada al software de trabajo de redes neuronales, entre otras, que son explicadas en el siguiente capítulo en una sección creada específicamente para este software. Del Preprocesador pueden salir archivos tipo formato plano con información de dinagramas de entrenamiento o con información de dinagramas de prueba.

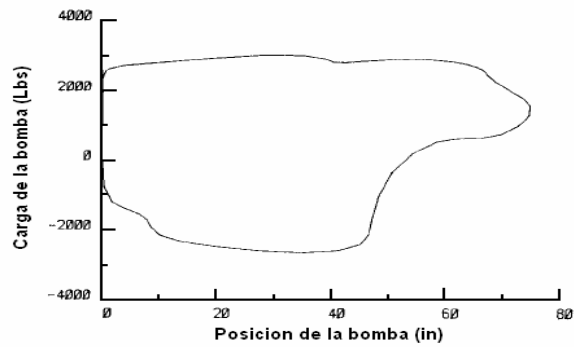
4.2.2.3. Otros métodos consultados. En esta sección se tratara los otros métodos que fueron consultados para el reconocimiento de patrones y de los cuales se hará una breve descripción.

- **METODO DE LA MALLA.** Se trata de un método simple, que fue desarrollado temprano en la búsqueda de métodos para resolver el problema de reconocimiento de dinagramas de fondo con un efectivo y fácil método de programación.

El primer paso para este método o cualquier otro método de reconocimiento de patrones es retirar la información irrelevante y solo dejar la información estrictamente necesaria para la solución del problema. En el reconocimiento de problemas en el dinagrama de fondo sólo la forma es importante. Por esto los valores actuales para la carga de fluido (eje Y) y recorrido del pistón (eje X) no son tenidos en cuenta en problemas de reconocimiento de patrones, nosotros podemos normalizar los DDC (Down hole Dinamometer Card) para facilitar y mejorar la eficiencia, ya que teniendo a todos los dinagramas en una misma escala es mucho mas fácil su reconocimiento.

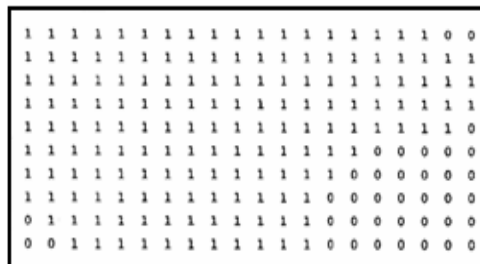
Una vez los DDC del pozo son normalizados, están listos para transformarlos en una matriz de ceros y unos. Esta matriz (matriz de entrada) esta formada de la siguiente manera. Primero el dinagrama de fondo o DDC es superpuesto sobre un sistema enmallado de 20X10 celdas inicializadas con un valor de cero (0). Esta configuración de malla fue pensada para proporcionar una buena resolución sin exceder memoria o requerimientos computacionales. Luego las celdas a través del límite del DDC toman el valor de 1 y finalmente el grupo de celdas en el interior del DDC se les da también el valor de 1. la figura 43 muestra como el método del grid describiría el DDC de la figura 42 con una matriz de unos y ceros.

Figura 42. Dinagrama de fondo



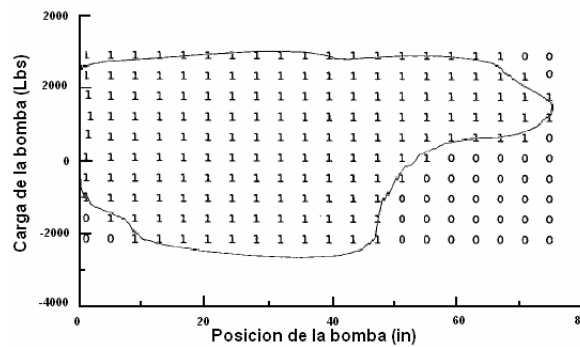
Fuente: Paper SPE 17313

Figura 43. Matriz que representa un dinagrama de fondo



Fuente: Paper SPE 17313

Figura 44. Fusión dinagrama - matriz



Fuente: Paper SPE 17313

Una vez la matriz de entrada ha sido fijada o formada, esta es comparada con otras matrices que representan los problemas mas comunes en las bombas de subsuelo, estas matrices referencia están construidas de forma diferente a las de entrada, ya que las celdas limite tienen el valor de 1, mientras que el valor de las celdas restantes depende de que tan lejos o cerca se encuentren de la celda limite. Las celdas del interior de la carta tienen valores mayores a uno (1) y las celdas exteriores tienen valores menores a uno (1) según corresponda. Ver figura 45.

Figura 45. Matriz referencia con niveles de valores

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1
1	2	3	4	4	4	4	4	4	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2	3	4	5	5	5	5	5	4	3	2	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	2	3	4	5	5	5	5	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2
1	2	3	4	4	4	4	4	4	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3
1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-4	-4	-4
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-5	-5
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-5

Fuente: Paper SPE 17313

El costo total del ajuste entre la matriz de entrada y una de las matrices referencia, $C(A,B)$, puede ser calculada por:

$$C(A, B) = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{20} |a_{ij} - f(b_{ij})| \quad (1)$$

Donde $f(b_{ij})$ es definida como:

$$f(b_{ij}) = 1 \text{..si..} a_{ij} = 1 \text{..y..} b_{ij} \geq 1 \quad (2)$$

$$f(b_{ij}) = 0 \text{..si..} a_{ij} = 0 \text{..y..} b_{ij} \leq 0 \quad (3)$$

De otra forma $f(b_{ij}) = b_{ij}$ (4)

El razonamiento para $C(A,B)$ es el siguiente:

1. Si una celda de entrada a_{ij} tiene un valor de cero y su correspondiente celda de referencia b_{ij} es una celda exterior con un valor igual o menor a cero (0) esta pondría no tener implicación en el ajuste ya que ambas celdas con exteriores para sus respectivos dinagramas de bomba.
2. Si la celda de entrada tiene un valor de cero (0) y su celda referencia tiene un valor igual o mayor a uno (1), el costo computado para este caso depende de que tan lejos esta la celda referencia de la celda limite.
3. Lo mismo se hará en la confrontación de celdas de entrada con valores de uno (1) y sus respectivas celdas referencia.
4. El paso final del proceso de confrontación es darle un valor a cada una de las cartas de referencia y se ordenan de acuerdo a su costo total de confrontación, $C(A,B)$ con los patrones de entrada. Las cartas referencia con el costo total mas bajo, es la que va a representar la condición de funcionamiento de la bamba de subsuelo.

- **METODO DEL POLIGONO**

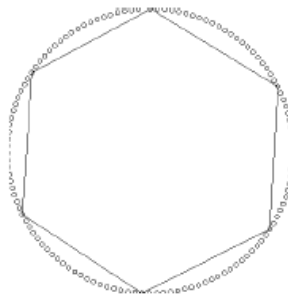
EXTRACCION DE PUNTOS RELEVANTES (PR)

El método de extracción de puntos relevantes es basado en el cambio de la dirección de un grupo de datos, los cuales representan la carta dinamométrica.

Para validar el algoritmo, una carta dinamométrica circular es artificialmente insertada, dando una visualización inmediata del resultado. El ejemplo ilustrado en

la figura 46 muestra los resultados obtenidos cuando se ha definido una sensibilidad para una variación de ángulo de 60°.

Figura 46. Carta artificial para validar el algoritmo de la extracción del PR



Fuente: Paper SPE 84140

Fijando 20° como la variación permitida, el uso del algoritmo de la extracción del RP genera la Figura 47.

Reconocimiento De Patrones

El siguiente patrón de reconocimiento considera la existencia de P patrones de referencia, cada uno de ellos formados por un grupo de pares coordenados X,Y y su respectiva dispersión σ como se muestra en la figura 46. También se debe considerar que la extracción de patrones de reconocimiento o PR de una carta dinamométrica CD es considerado como perteneciente al patrón P_i solo si:

$$\mu(P_i) > \mu(P_j) \dots \dots \dots i, j = 1, \dots \dots \dots, P \quad \mathbf{e} \quad i \neq j \quad (5)$$

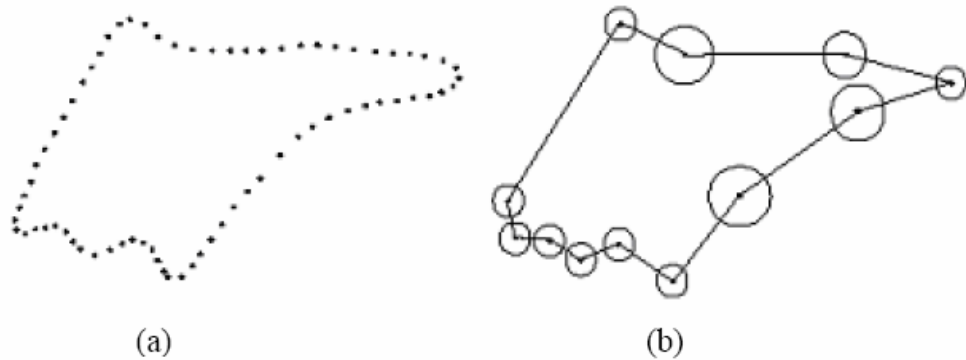
Donde $\mu(P_i)$ indica ajuste entre el patrón P_i y el PR de los datos adquiridos. El ajuste por cálculo es:

- Considerar un grupo de N pares (X,Y) con su respectiva dispersión σ compone el patrón P_i .

- Para cada par (X_k, Y_k) y su dispersión respectiva σ_k , con $k=1, \dots, N$ considerando como la distancia entre el par (X_k, Y_k) y el PR mas cercano de la CD (distancia Euclidiana).
- Si $d_k > \sigma_k$ entonces $C_k = 0$
- Si $d_k \leq \sigma_k$ entonces $C_k = 1 - \frac{d_k}{2\sigma_k}$ (6)

- $\mu(P_i) = \frac{\sum_{k=1}^N C_k}{N}$ (7)

Figura 47. Patrones de puntos relevantes y su respectiva dispersión.



Fuente: Paper SPE 84140

4.2.3 Etapa 3. El siguiente paso luego de obtener los dinagramas en el formato de entrada al software de RNA es realizar el entrenamiento de la red, en este punto se le proporciona además del archivo proveniente del preprocesador, características de la red a entrenar sobre número de capas ocultas número de neuronas en cada una de ellas, con esto se puede entrar al software de RNA y completar la arquitectura de la red y comenzar el entrenamiento de esta seleccionando antes los parámetros de entrenamiento (rata de aprendizaje, momentum, error marginal, criterios de parada, etc). El entrenamiento se realiza utilizando el algoritmo de aprendizaje "Backpropagation".

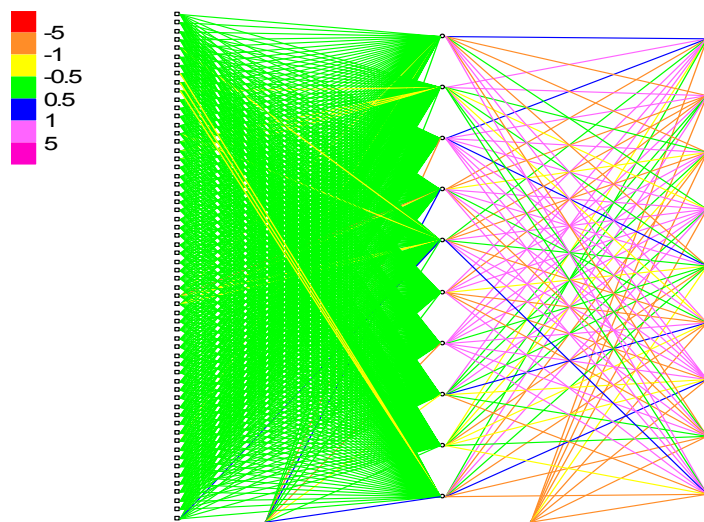
Luego de parado el entrenamiento se tienen en cuenta que el error marginal sea inferior al 1% y que sean aprendidos la totalidad de los patrones de entrenamiento (aprendizaje = 100%), si los resultados no satisfacen alguno de estos dos criterios se regresa a los parámetros de entrenamiento y se realizan modificaciones pertinentes (ver sección 5.4). Antes de continuar describiendo el proceso es necesario aclarar que los datos provenientes del preprocesador llegan a la red en dos tiempos diferentes, el primero corresponde a un archivo con la información de los dinagramas de la base de datos de entrenamiento que entra con la información proporcionada por la persona encargada de realizar la prueba para realizar el entrenamiento como fue descrito anteriormente, y el segundo archivo entra al software en el momento de realizar la evaluación de la red con la información de los dinagramas prueba (ver capítulo 5 acerca de patrones de entrenamiento y prueba). La evaluación de la red se realiza teniendo en cuenta la respuesta a los patrones de entrenamiento y a los patrones prueba constituidos por dinagramas de pozos que presentan uno o dos problemas en el equipo de subsuelo de la unidad de bombeo mecánico, si la evaluación de la red arroja resultados buenos en cuanto a el reconocimiento de uno y dos problemas, entonces se termina el proceso de optimización de la red, si es el caso contrario es necesario modificar la estructura de la red y volver a realizar el proceso.

4.2.3.1 Topología de la red. En esta sección se describirá brevemente la secuencia de sucesos y selección de la mejor topología para nuestro problema, para esto se muestran ejemplos de las arquitecturas estudiadas, y de las funciones de transferencia de cada capa a través de las fases del proyecto, convergiendo finalmente la descripción total del mejor arreglo para este trabajo. (Para ver el seguimiento y obtener un mejor entendimiento del proceso paso a paso de optimización ver sección 5.4).

La topología de la red en la primera etapa de prueba corresponden en este trabajo a 60 y 120 entradas en una primera etapa, y 8 y/o 9 neuronas de salida con número de capas ocultas igual a 1 y 10 neuronas en esta capa de acuerdo principalmente a:

- Las limitaciones del QwikNet¹⁰ versión de prueba utilizada en esta primera instancia.
- Pruebas pertinentes sobre los datos de entrada necesarios para que la red realice las tareas planteadas.

Figura 48. Esquema de la red entrenada 60:10:9 del presente proyecto.



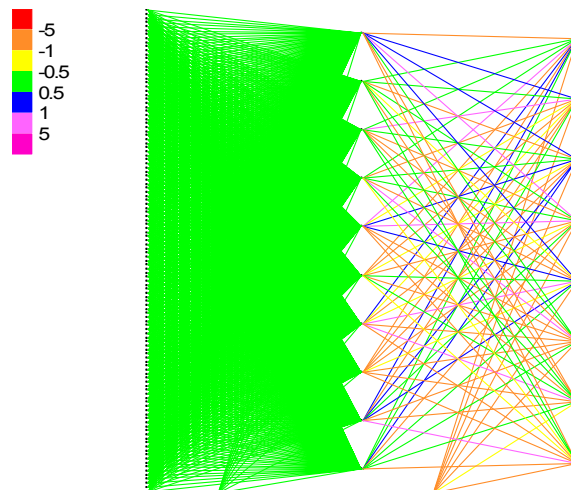
Fuente QwikNet 2.23 versión de prueba.

Las figuras 47 y 48 muestran redes neuronales artificiales de 60:10:9 y 120:10:8 respectivamente según visualización en el QwikNet. En estas graficas pueden visualizarse las redes conectadas en su totalidad entre cada neurona con todos los elementos de su capa anterior como se trabajo en todas las configuraciones estudiadas, además se observan conexiones en diferentes colores que

¹⁰ Software QwikNet versión 2.23 <http://www.kagi.com/cjensen>.

corresponden a el valor de los pesos de la red después de un proceso de entrenamiento según la convención situada en la esquina superior izquierda, otro aspecto importante sobre las graficas que nos muestra el software es que de cada neurona sale una conexión hacia atrás a un punto separado notoriamente de la capa anterior en el cual convergen las conexiones, todas estas poseen colores que representan el grado de importancia de cada neurona.

Figura 49. Esquema de la red entrenada 120:10:8 del presente proyecto

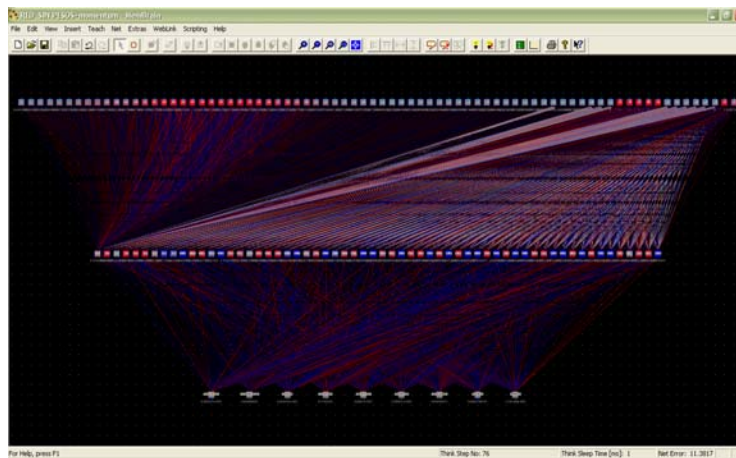


Fuente QwikNet 2.23 versión de prueba.

En una segunda etapa se decidió y/o se concluyó que las neuronas de entrada serían 60 y las de salida 9 en base a los resultados presentados. La segunda etapa comprende un trabajo de investigación y búsqueda de la mejor arquitectura y pruebas de sensibilidad del número de neuronas en la capa oculta y número de capas ocultas con el software MemBrain¹¹, en esta etapa se estudiaron diferentes arquitecturas para encontrar la que mejor resultados presente.

¹¹ MemBrain Neural Network Simulator <http://www.membrain-nn.de>.

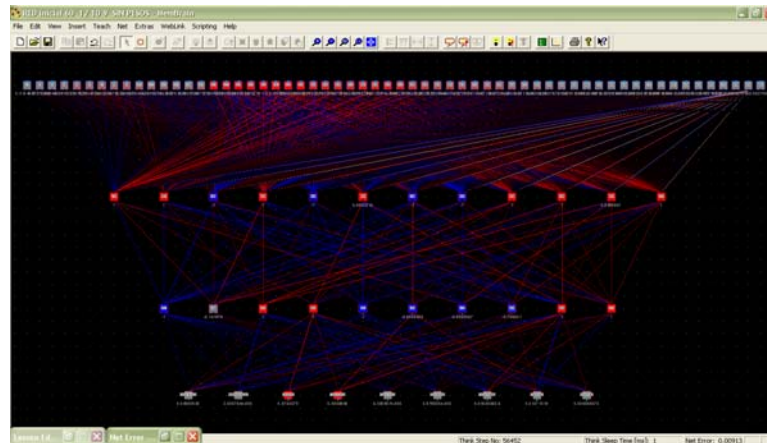
Figura 50. Esquema de la red entrenada 76:60:9 del presente proyecto.



Fuente: Software MemBrain versión libre.

Las figuras 49 y 50 muestran ejemplos de las redes neuronales artificiales estudiadas en la segunda etapa de 76:60:9 y 60:12:10:9 respectivamente según visualización en el "MemBrain". En estas graficas pueden visualizarse las redes conectadas en su totalidad, además se observan conexiones en diferentes colores que corresponden a el valor de los pesos de la red después de un proceso de entrenamiento, mientras el color se acerque más a rojo e valor estará mas cercano al máximo permitido establecido en el software, y mientras más cercano este del color azul se aproximará al mínimo. Otro aspecto importante sobre las graficas que nos muestra el software es que cada neurona posee un color que puede variar entre el gris y el rojo, y que significa que la neurona proporciona un valor de salida aproximado al valor mínimo o al valor máximo respectivamente permitido por su función de transferencia. Como valor agregado el software permite bautizar a cada neurona independientemente del tipo de capa a la cual pertenezca, permitiendo personalizar la red para una tarea específica y familiarizando al usuario con esta.

Figura 51. Esquema de la red entrenada 60:12:10:9 del presente proyecto.



Fuente: Software MemBrain versión libre.

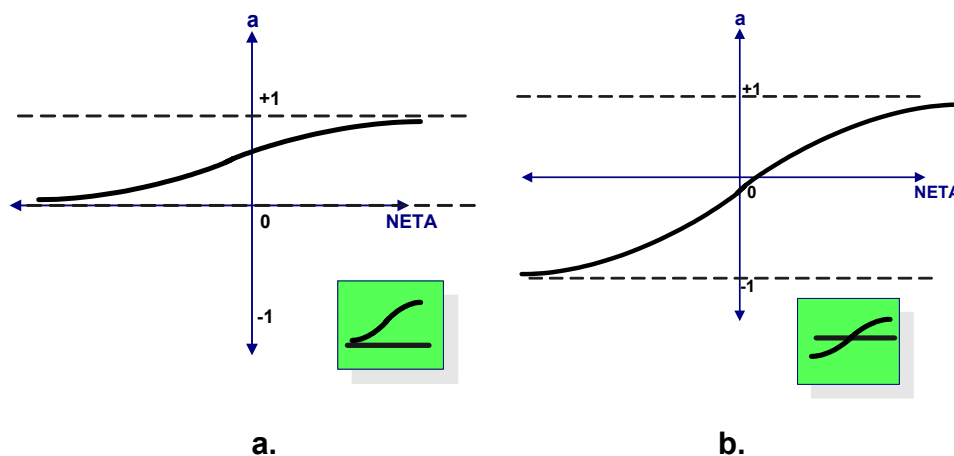
Funciones de Transferencia:

La salida total de una neurona está determinada por la función de transferencia f , la cual puede ser una función lineal o no lineal de la entrada neta, y que es escogida dependiendo de las especificaciones del problema que la neurona tenga que resolver. Como la selección de la función de transferencia tiene que ver con el problema y la forma de presentación de los resultados y/o con el resultado objetivo del proyecto, es necesario explicar como se quieren representar los resultados.

En este proyecto se busca que la red neuronal sea capaz de identificar los problemas presentes en el equipo de subsuelo de la unidad de bombeo mecánico es decir que la red permita identificar más de un problema y que este reconocimiento este ligado a un numero que represente el grado o probabilidad de que el dinagrama analizado se asemeje a uno o más de los dinagramas patrón de determinado problema. Teniendo en cuenta que una manera sencilla de expresar una probabilidad es asociarla con valores entre cero (0) y uno (1), y que según la

arquitectura descrita anteriormente cada neurona de salida representa un problema a reconocer por la red, es necesario utilizar como función de transferencia para la capa de neuronas de salida la función Sigmoidal (ver sección 3.2.2). Esta función representada en la figura 52a posee como intervalo de valores de salida el necesario para cumplir nuestro objetivo. El alcance de esta tarea se explica de la siguiente forma: si el valor de salida de una neurona es cercano a cero el dinagrama en cuestión no presenta el problema al cual está ligada dicha neurona, por el contrario si el valor de salida de la neurona es cercano a uno tendrá posibilidad el dinagrama de presentar el problema al cual está ligada la neurona.

Figura 52. Esquema de funciones de transferencia sigmoidal y tangsigmoidal.



Fuente: Autores del proyecto

Los datos de entrada a las neuronas de salida dependen de los datos de las neuronas de la capa oculta inmediatamente anterior y directamente de las funciones de transferencia de estas. La función de transferencia establecida para la capa oculta es la función Tangente Sigmoidal, figura 52b de acuerdo con lo planteado en el paper SPE 25420, decisión que justificamos como acertada ya que esta función que maneja un rango entre $[-1, 1]$ permite flexibilidad y proporciona un campo suficientemente amplio de datos de entrada a las neuronas

de salida que se puede traducir en una relación más concreta entre las entradas y las salidas de la red y/o en una solución más estable que permita un reconocimiento óptimo y que además minimice la posibilidad de saturación de las neuronas. Una neurona está saturada cuando los datos de entrada no poseen una relación concreta con la salida y por tanto la neurona puede que reaccione de la misma manera a datos de entrada diferentes.

Con estas características fueron estudiadas diferentes arquitecturas y teniendo en cuenta los resultados en cuanto a identificación de uno o más problemas se concluyó que la mejor arquitectura luego de realizar una sensibilidad de neuronas y capas, es una red con una capa oculta y entre 10 y 20 neuronas en esa capa; sin embargo al aplicar este estudio al campo escuela Colorado (sección 5.5) se determinó que la mejor arquitectura para el análisis de los dinagramas del campo es 60:10:9 (ver sección 5.4 y 5.5), la cual se muestra en el Anexo D.

4.2.3.2 Entrenamiento. El entrenamiento de las diferentes redes estudiadas se realizó con uno de los algoritmos de aprendizaje más efectivos para el tipo de redes comúnmente usado en tareas de reconocimiento y clasificación, Backpropagation, los parámetros de entrenamiento fueron fijados así:

➤ La tasa de aprendizaje utilizada es de 0.1 y el error máximo tolerable es del orden de 0.01 (Observar proceso de entrenamiento y establecimiento de parámetros para cada prueba en el capítulo 5).

Los datos de validación están compuestos de dinagramas prueba explicados en la sección 5.3 y sus respectivos análisis de prueba descritos en la sección 5.4 y 5.5.

4.2.4 Etapa 4. Los resultados en cada sub-etapa del proceso anterior se visualizaban de acuerdo a las posibilidades y ayudas que presentara el software de RNA, pero según el propósito de este proyecto en el cual la red neuronal debe

ser capaz de identificar uno o más problemas presentes en el equipo de subsuelo de la unidad de bombeo mecánico y que este reconocimiento este ligado a un número que represente el grado o probabilidad de que el dinagrama analizado se asemeje a uno o más de los dinagramas patrón de determinado problema, la visualización de los resultados de la red tienen que cumplir con las especificaciones mostradas en el documento del borde inferior izquierdo de la forma esquemática de la metodología de trabajo.

Para conseguir este propósito y examinando las herramientas del software de redes neuronales se puede obtener una visualización de los resultados en el área de trabajo de este, esta cumple con las expectativas sobre los resultados finales mostrando las neuronas de salida bautizadas con el problema correspondiente a identificar y su respectivo valor de probabilidad de ocurrencia de la situación de la bomba. (ver anexo D para visualización de resultados.)

5. APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES EN LA DETERMINACION DE PROBLEMAS EN EL EQUIPO DE SUBSUELO DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO MECÁNICO

El bombeo mecánico es el sistema de levantamiento artificial más usado en la industria de los hidrocarburos y con el fin de obtener una operación apropiada de estas unidades es necesario realizar supervisión y monitoreo de las condiciones a las cuales está operando. Los pozos con este sistema utilizan dinagramas para la determinación de problemas en el equipo de subsuelo; la interpretación de estos requiere obligatoriamente de un tiempo considerable de análisis por parte de los ingenieros y expertos en el tema, lo cual se traduce en la dificultad para realizar un monitoreo constante y rápido de los problemas presentados en el equipo de fondo de una unidad de bombeo mecánico. Con base en esta necesidad se buscó un método que pudiera cumplir con este tipo de labor, encontrando las redes neuronales como una de las únicas técnicas capaces de realizar labores de reconocimiento, capaz de entender o aprender el trabajo de identificación que no se adhiere a formulas ni secuencias de reglas preestablecidas, capaz de simular el razonamiento de un ingeniero de petróleos con el propósito de desarrollar una herramienta para la identificación automática de problemas en la bomba de un equipo de bombeo mecánico que permita una toma ágil de decisiones y que requiera un mínimo de tiempo del experto.

En adelante en este capítulo se describe la aplicación de la metodología señalada en el capítulo anterior y se señala en detalle el recorrido necesario para obtener el tipo de herramienta descrito en el párrafo anterior, además se describe los estudios y pruebas preliminares y finalmente la aplicación específica al Campo-Escuela Colorado con su respectivo análisis de resultados.

Como estudio previo sobre la aplicación de las redes neuronales a la identificación de problemas de la producción por bombeo mecánico se estableció una etapa de análisis y pruebas en donde se obtuvieron parámetros generales sobre el entrenamiento, optimización y base de datos de entrenamiento además de valoración sobre las entradas necesarias de la red para cumplir con el reconocimiento. Esta etapa de estudio preliminar esta dividida por dos sub-etapas y de acuerdo con esto las secciones 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 describen el proceso y las conclusiones respectivas.

5.1 PATRONES DE ENTRENAMIENTO

Los patrones de entrenamiento son el pilar fundamental en el entrenamiento de una red neuronal, debido a que son estos patrones los que va a tomar la red para hacer las comparaciones con los nuevos patrones o dinagramas y decidir a cual comportamiento de los patrones de entrenamiento se asemeja más; por esta razón es necesario tener una buena base de patrones de entrenamiento.

En la primera etapa del proceso de elección de patrones de entrenamiento se seleccionaron una serie de dinagramas que se encontraban en el software Echometer como ejemplos, los cuales presentaban los principales y más frecuentes problemas en la bomba de subsuelo del equipo de bombeo mecánico, estableciendo así una primera base para el desarrollo de la red neuronal.

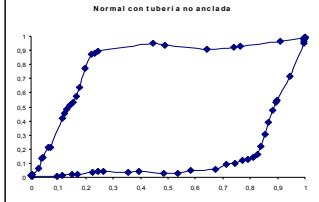
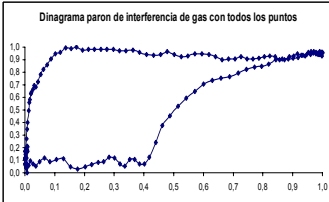
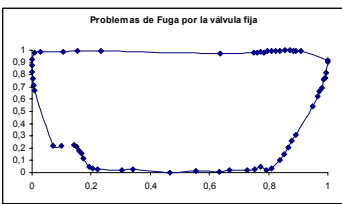
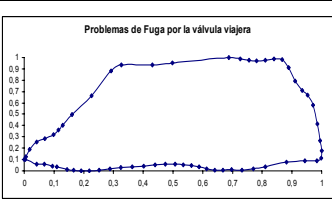
Los patrones de entrenamiento fueron los siguientes:

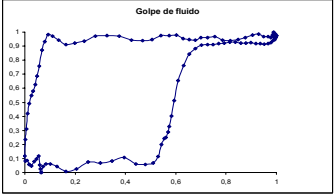
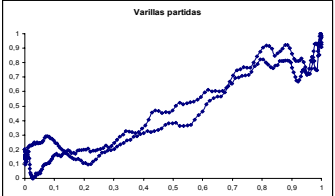
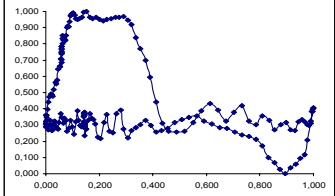
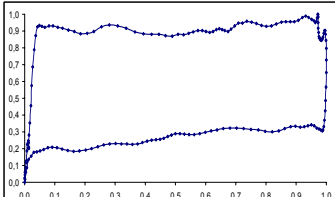
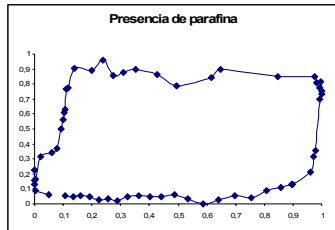
- Normal
- Interferencia de gas
- Fuga en la válvula fija
- Daño en la válvula viajera
- Basura en la válvula fija
- Golpe de fluido

- Varillas partidas
- Acción errática de la válvula viajera

Luego razonando sobre la organización de los patrones de entrenamiento se observó que algunos de los patrones representaban el mismo problema e manera general y por lo tanto no era necesario tener más de un patrón, con esto se hizo un nuevo screening y se reforzó la base de entrenamiento con otros nuevos problemas, logrando así obtener un total de 9 patrones que se describen en la siguiente tabla:

Tabla 7. Patrones de entrenamiento etapa 1.

INTERPRETACION	DINAGRAMA
Funcionamiento normal con sarta no anclada	 <p>Normal con tubería no anclada</p> <p>The graph shows a square-like pattern on a 0-1 coordinate system. The top edge is at y=1, the bottom edge is at y=0, the left edge is at x=0, and the right edge is at x=1. The data points are connected by a blue line with diamond markers.</p>
Interferencia de gas	 <p>Dinagrama paron de interferencia de gas con todos los puntos</p> <p>The graph shows a curve that starts at (0,0), rises to a plateau at y=1.0 between x=0.1 and x=0.4, then drops to a lower plateau at y=0.8 between x=0.4 and x=1.0. The data points are connected by a blue line with diamond markers.</p>
Daño en la válvula fija	 <p>Problemas de Fuga por la válvula fija</p> <p>The graph shows a curve that starts at (0,1), drops to a plateau at y=0 between x=0.1 and x=0.8, then rises back to y=1 at x=1. The data points are connected by a blue line with diamond markers.</p>
Daño en la válvula viajera	 <p>Problemas de Fuga por la válvula viajera</p> <p>The graph shows a curve that starts at (0,0), rises to a plateau at y=1 between x=0.3 and x=0.9, then drops to y=0 at x=1. The data points are connected by a blue line with diamond markers.</p>

<p>Golpe de fluido</p>	
<p>Varillas partidas</p>	
<p>Fuga en el barril</p>	
<p>Golpe abajo</p>	
<p>Presencia de Parafinas o Asfaltenos en la bomba</p>	

Fuente: Autores del Proyecto

En este primer proceso o primera etapa se trabajo con la versión libre de un software llamado QwickNet versión 2.23 pero como toda versión libre tenia sus restricciones, así que solo se utilizo para empezar a familiarizarnos con estos software y hacer algunas pruebas con lo que nos permitía hacer.

En la segunda etapa de este proceso de evaluación, se tomó la misma base de entrenamiento que se tenia al final de la etapa uno, pero se utilizo un nuevo

software llamado MemBrain mucho mas completo y flexible a los requerimientos, lo cual permitió hacer pruebas de sensibilidad de datos permitiendo variar y mirar el comportamiento de la red con las diferentes arquitecturas descritas en la sección 5.4. Las variaciones de arquitectura mostraron resultados que son mostrados y discutidos en la fase de entrenamiento y optimización, pero los resultados fueron poco satisfactorios. Todo este proceso se hizo con el fin de mejorar el reconocimiento de la red neuronal, pero como no hubo ningún aporte positivo se examinaron otras opciones que pudieran ayudar a mejorar el desempeño de la red, conduciendo a mejorar la base de datos de entrenamiento, buscando otros dinagramas o patrones donde se pudiesen apreciar con mayor claridad los problemas de la bomba y que involucraran más de una situación, con lo cual mejoró notablemente el reconocimiento de los patrones, aportando así en las características principales de la base de datos de entrenamiento. Estos dinagramas incluidos son los dos primeros dinagramas de los denominados “Patrones elaborados combinados etapa 1” en la siguiente sección.

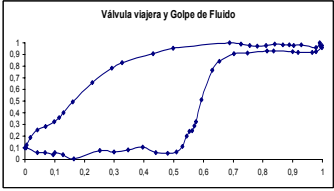
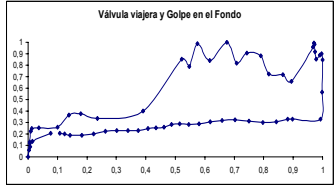

Esta situación demuestra que la base de datos de entrenamiento es muy pequeña y que es necesario involucrar ejemplos combinados en el entrenamiento de la red que permitan la identificación de más de una situación en un dinagrama. Para esto y en consecuencia con la cantidad de dinagramas necesarios para completar la base de datos de entrenamiento fue necesario elaborar dinagramas llamados sintéticos que cumplieran con las exigencias y posibilidades en cuanto al comportamiento de los dinagramas a los cuales se enfrentará la red en la fase de prueba y predicción.

5.2 PATRONES DE PRUEBA

Los patrones de prueba son muy importantes debido a que estos nos dan una idea de cómo se está comportando la red a de los requerimientos y pautas para determinar los problemas y las correcciones necesarias para obtener los resultados deseados. Esto conduce así, a la optimización de la red para poder entregar un producto que en el momento que sea requerido para la predicción pueda tener una mejor confiabilidad en sus resultados.

Los patrones de prueba en la primera etapa fueron dinagramas construidos que corresponden a combinaciones de los dinagramas utilizados para el entrenamiento en la etapa 1, conformando así un total de 3 dinagramas o patrones para hacer las primeras pruebas. Los dinagramas construidos y utilizados para esta primera etapa están a continuación:

Tabla 8. Patrones elaborados combinados etapa 1.

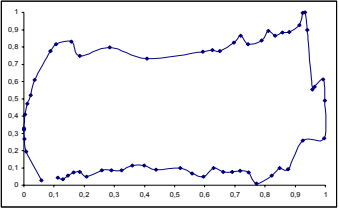
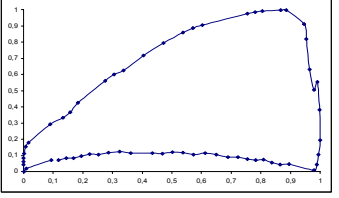
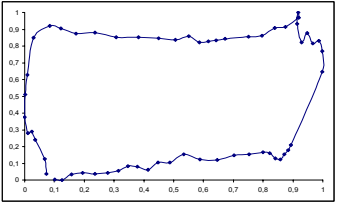
INTERPRETACION	DINAGRAMA
1.Daño en la válvula viajera y golpe de fluido.	
2.Daño en la válvula viajera y golpe en el fondo	
3. Golpe abajo con acción errática de la válvula.	

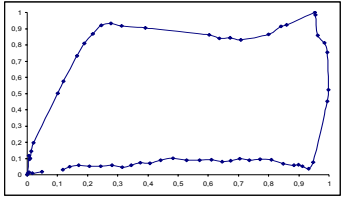
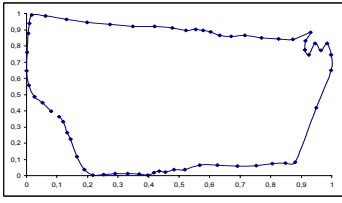
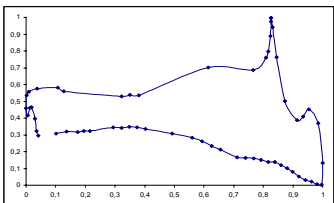
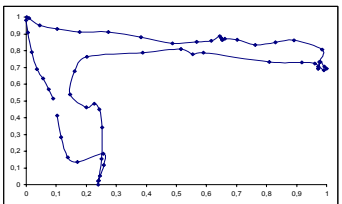
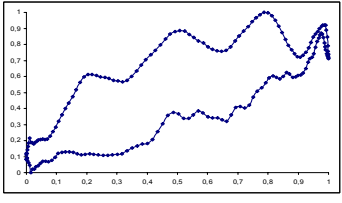
Fuente: Autores del Proyecto

En la segunda etapa de prueba, los dinagramas de prueba corresponden a dinagramas del Campo Escuela Colorado de donde se escogieron 8 dinagramas los cuales se procesaron para hacer las primeras pruebas con datos reales de campo.

Los dinagramas escogidos y sus respectivas interpretaciones que fueron realizadas por el CENTRO DE INVESTIGACIÓN DEL GAS Y DEL PETRÓLEO de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER para el Campo-Escuela Colorado están a continuación:

Tabla 9. Patrones de prueba etapa 2.

INTERPRETACION	DINAGRAMA
<p>La prueba de válvulas muestra fuga severa en la válvula viajera y retardo en el cierre de la válvula fija. Problemas que se observan mejor si se mira el dinagrama de fondo normalizado.</p>	
<p>La prueba de válvula muestra fuga severa en la válvula viajera</p>	
<p>el dinagrama presenta una fuga en la válvula viajera y un pequeño golpe al final de la carrera ascendente</p>	

<p>El dinagrama muestra que la bomba presenta un pequeño golpe al final de la carrera ascendente además que la válvula viajera funciona mal.</p>	
<p>La carta dinamométrica nos indica que la bomba presenta un golpe al final de la carrera ascendente y, además, la válvula fija presenta problemas de funcionamiento</p>	
<p>El dinagrama nos muestra que el pistón golpea el barril al final de la carrera ascendente y también se presentan posibles fallas en las dos válvulas.</p>	
<p>Golpe de fluido debido al bajo nivel de fluido que presenta la bomba</p>	
<p>Este dinagrama es un fiel comportamiento de varillas partidas, que no se observa muy bien debido a la normalización, ya que el dinagrama se expande a la escala de la gráfica.</p>	

Fuente: Autores del proyecto.

5.3 PRE-PROCESAMIENTO DE DATOS.

De acuerdo con la metodología planteada, para introducir uno o más dinagramas en la red neuronal artificial para ser analizados, estos deben ser sometidos a diferentes procesos tales como normalización de los datos, ordenamiento de estos por regiones a ser analizadas, selección de puntos significativos (PS), extracción y ordenamiento del componente de carga de cada PS; además de estas tareas es necesario elaborar un archivo con esta información donde se especifiquen las entradas de la red y las posibles salidas de esta, creando así, un archivo que sea reconocido y cumpla las especificaciones del software de redes neuronales que para el caso de este estudio es conocido como MemBrain¹⁰.

Para efectos de una mayor flexibilidad y tiempo de ejecución del estudio de nuestra aplicación, para este trabajo se diseñó y elaboró un programa capaz de cumplir con todas las tareas de Pre-procesamiento, y sus especificaciones se encuentran en el Anexo E. El programa realiza este proceso partiendo de un archivo plano (tipo block de notas) el cual contiene los datos de carga y posición del dinagrama y que son extraídos directamente del software Echometer, este archivo es abierto por el Pre-procesador el cual automáticamente genera dos gráficos de dinagramas normalizados (véase sección 5.5.5 para visualización del Pre-procesador); el primero con la totalidad de los puntos extraídos del Echometer y el segundo con los 60 puntos significados acordados como estradas de la red y los cuales pueden variar según los requerimientos en estudios posteriores.

Los datos de salida del Pre-procesador son los 60 datos de carga de cada dinagrama que son guardados en un archivo plano especialmente diseñado para que sea reconocido por el software MemBrain¹⁰. Para ampliar la información del funcionamiento del Pre-procesador, consultar el Anexo E.

5.4 ENTRENAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE LA RED.

En esta sección se encuentra el seguimiento de las etapas de entrenamiento y optimización de la red descrito de manera concreta y breve, cualquier extensión de esta información se puede encontrar en el Anexo C.

1. La primera etapa se realizó con un software llamado “Qwiknet”, y se estudiaron redes perceptron multicapa de configuraciones o topologías 60:10:9, 120:10:9, de 60 entradas: 9salidas y 120 entradas: 9 salidas respectivamente.
2. La segunda etapa comprende un trabajo de investigación y búsqueda de la mejor arquitectura y pruebas de sensibilidad del número de neuronas en la capa oculta y numero de capas ocultas con el software “MemBrain” teniendo en cuenta que al llegar a esta instancia ya se ha establecido que las neuronas de entradas a la red son 60 (ver sección 5.4), en esta etapa se estudiaron diferentes arquitecturas para encontrar la que mejor resultados presente.

5.4.1 Primera etapa. En primera instancia se evaluaron redes de acuerdo con la forma en la que estaba organizada los dinagramas de entrenamiento tipo A y B, y de acuerdo a la forma de introducir los 60 puntos significativos de un dinagrama, redes con subíndice 1 y 2. En adelante se realiza una breve descripción de cada red, del entrenamiento y ajuste para obtener un error considerablemente pequeño sobre los patrones de entrenamiento; además al final de la descripción y visualización de los resultados sobre cada tipo de red, se muestran los resultados sobre patrones de prueba y conclusiones al respecto.

Redes tipo A: Para la basa de datos de entrenamiento de redes tipo A inicialmente se tomaron los principales problemas de los ejemplos del TMW entre los cuales están:

1. FUNCIONAMIENTO NORMAL SARTA NO ANCLADA
2. INTERFERENCIA DE GAS
3. FUGA EN LA VALVULA FIJA
4. DAÑO EN LA VALVULA VIAJERA SIN ANCLA
5. BASURA QUE ATASCA LA AVERTURA DE LA VALVULA FIJA
6. GOLPE DE FLUIDO
7. VARILLAS PARTIDAS
8. ACCION ERRATICA DE LA VALVULA VIAJERA

De acuerdo a los problemas considerados para estas redes el número de neuronas de salida es ocho (8) como es descrito en el capítulo 4, cada neurona de salida corresponde a un problema a ser reconocido por la red.

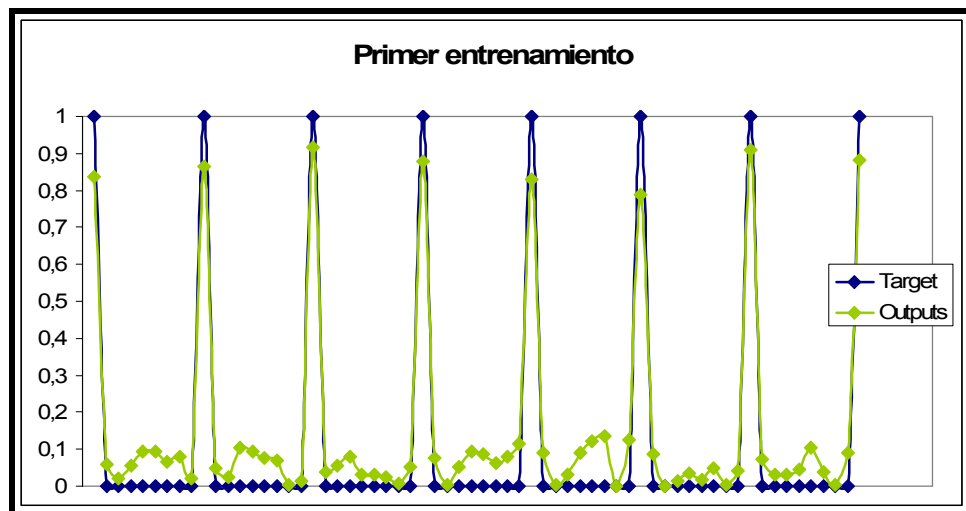
Redes A₁ y A₂: De acuerdo a la forma de introducir los datos en la red se realizaron dos redes y se trabajaron al mismo tiempo para realizar comparaciones para determinar la sensibilidad y grado de importancia de los datos de entrada, esto se realizó de la siguiente manera:

La **red A₁** posee 60 neuronas de entrada que corresponden cada una a la coordenadas Y de los 60 puntos significativos de un dinagrama de fondo, de la siguiente manera: Y1 a N1, Y2 a N2,....., Y60 a N60; donde N corresponde a la neurona de entrada. *Es importante señalar que se realizaron pruebas con los datos de las coordenadas X de posición el pistón, y que estas no mostraron ventajas sobre las redes cuyas entradas son únicamente los datos de carga en el reconocimiento de los problemas entrenados.* Por lo tanto y en base a lo expuesto la red A₁ tiene arquitectura 60:10:8 (60 nodos de entrada, 10 neuronas en la capa oculta y 8 nodos de salida).

En el entrenamiento de la red primero se tomo una tasa de aprendizaje de 0.1, con un error marginal de 0.1 (error por debajo del cual se considera un patrón

aprendido), coeficiente de momentum de 0, además de criterios sobre el porcentaje de patrones aprendidos y mínimo error promedio entre otros. La visualización de los resultados sobre el primer proceso de entrenamiento se puede observar en la siguiente figura.

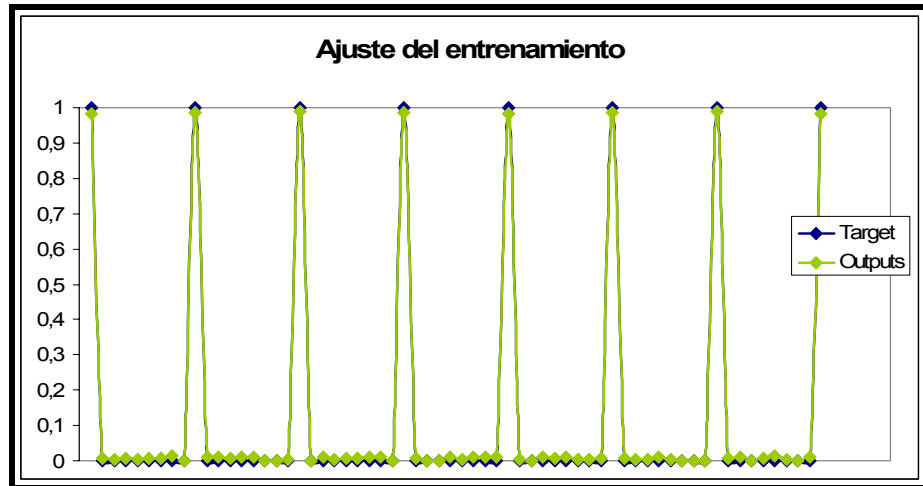
Figura 53. Visualización de resultados Red tipo A1 primer entrenamiento



Fuente: Autores del Proyecto

Cada punto azul corresponde al valor esperado y cada punto verde trazando una línea vertical sobre cada punto azul es la salida calculada por la red. Por lo tanto esta grafica indica que es necesario realizar reentrenamiento si se desea obtener resultados mejores. En base a lo anterior los criterios iniciales fueron modificados disminuyendo el error marginal a 0,01 para que el entrenamiento no se detuviera tan rápido y exigirle a la red menor error al considerar un patrón aprendido, además en entrenamientos posteriores para mejora en el valor de las salidas de la red fueron modificados otros parámetros de parada que se especifican en el Anexo C hasta obtener los siguientes resultados con un error de 0.0165304:

Figura 54. Visualización de resultados finales Red tipo A1



Fuente: Autores del Proyecto

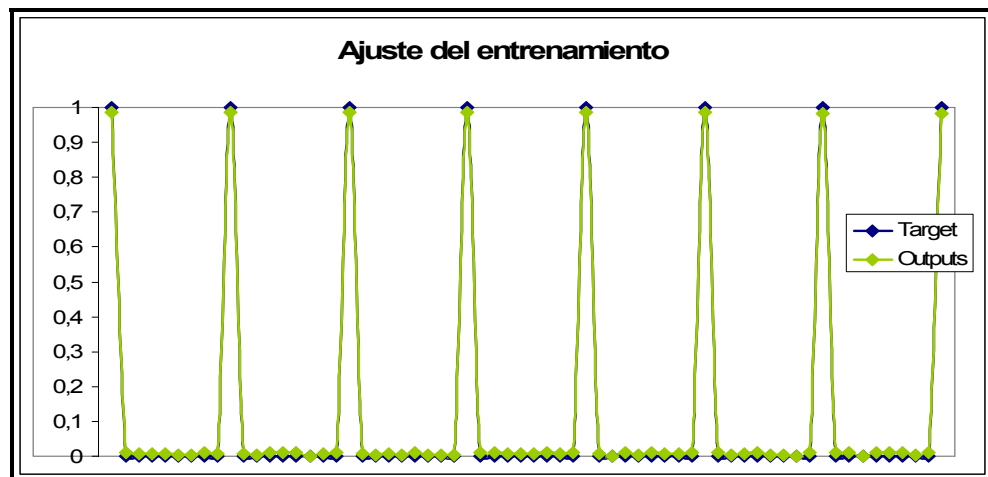
La **red A₂** posee 120 neuronas de entrada que corresponden a las parejas X,Y (posición del pistón, carga soportada) de los 60 puntos significativos de un dinagrama de fondo, donde cada nodo de entrada corresponden a cada una de las coordenadas de la siguiente manera: X1 a N1, Y1 a N2, X2 a N3, Y2 a N4X60 a N119 y Y60 a N120; donde N corresponde a la neurona de entrada. En base a lo expuesto la red A₂ tiene arquitectura 120:10:8 (120 nodos de entrada, 10 neuronas en la capa oculta y 8 nodos de salida)

De manera consecuente con el procedimiento realizado y los resultados obtenidos con la red A₁, los parámetros de entrenamiento iniciales y los criterios fueron los mismos para la red A₂, realizando un proceso de entrenamiento en el que las modificaciones sobre los parámetros de entrenamiento y además se disminuyó el error marginal a 0,01 y Los resultados fueron los siguientes iteraciones 5906, error 0.0109253 y porcentaje de patrones aprendidos 50%.

Como el entrenamiento se detuvo debido a que el promedio de la raíz cuadrada del error de datos del entrenamiento (Avg RMS Error) está por debajo de 0.01

teniendo solamente el 50% de los patrones de entrenamiento fueron aprendidos, para obtener mejores resultados el valor del Avg RMS Error se redujo a 0.001. Los resultados sobre los patrones de entrenamiento se pueden observar en la siguiente gráfica un error de 0.0171544:

Figura 55. Visualización de resultados finales Red tipo A2



Fuente: Autores del Proyecto

Como puede observarse hasta aquí los resultados de ambas redes sobre los patrones de entrenamiento son muy similares y muy buenos, por lo tanto es necesario realizar una prueba sobre otros patrones que proporcione elementos para valorar cada red. Estos nuevos patrones corresponden a dinagramas elaborados cuidadosamente con las formas ideales de los llamados "dinagramas sintéticos" y que poseen o involucran dos formas que representan problemas diferentes en diferentes regiones del dinagrama (ver sección 5.1). Los dinagrama prueba son únicamente 2, ya que con esto queremos evaluar principalmente el número de entradas de la red. Estos dinagramas involucran cada uno dos problemas los cuales son respectivamente:

1. Golpe de fluido y escurrimiento por válvula viajera
2. Compresión de gas y daño en la válvula viajera

En las siguientes tablas se pueden observar las reapuestas de las redes a cada uno de los dinagramas prueba.

Tabla 10. Resultados fase de prueba de la Red A₁

	normal	int gas	Fuga en valvula fija	Daño en valvula viajera sin ancla	Basura atascada en la valvula fija	Golpe de fluido	varillas partidas	Accion erratica de la valvula viajera
Golpe de fluido y escurrimiento por TV	0,536897	0,070983	0,000096	0,00001	0,000263	0,558082	0,035661	0,00289
Compresion de gas y escurrimiento	0,003458	0,986339	0,001753	0,003251	0,000223	0,009159	0,007569	0

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 11. Resultados fase de prueba de la Red A₂

	normal	int gas	Fuga en valvula fija	Daño en valvula viajera sin ancla	Basura atascada en la valvula fija	Golpe de fluido	varillas partidas	Accion erratica de la valvula viajera
Golpe de fluido y escurrimiento	0,000506	0,01694	0,001059	0,011504	0,002023	0,814298	0,000696	0,001892
Compresion de gas y escurrimiento	0,005638	0,958201	0,00574	0,011711	0,001795	0,01252	0,014383	0,000035

Fuente: Autores del Proyecto

Como puede observarse en ambos casos el reconocimiento de dos circunstancias problema en la bomba no es posible, sin embargo, el en ambos casos se reconoce uno de los dos problemas, cada red presenta mejores resultados que la otra en uno de los dos dinagramas prueba. Esto es a red A₂ reconoce mejor el problema de golpe de fluido que la red A₁, y la red A₁ reconoce mejor el problema de compresión de gas que la red A₂.

Luego de analizar estos resultados y buscando establecer los datos de entrada a la red más relevantes para la tarea de reconocimiento, los dinagramas de la base de entrenamiento fueron reorganizados creando las redes tipo B.

Red B: Esta red comprende problemas reorganizados de tal forma que los ejemplos concernientes a daños u obstrucción por ejemplo en la válvula fija constituyan un solo tipo de problema, de la siguiente manera:

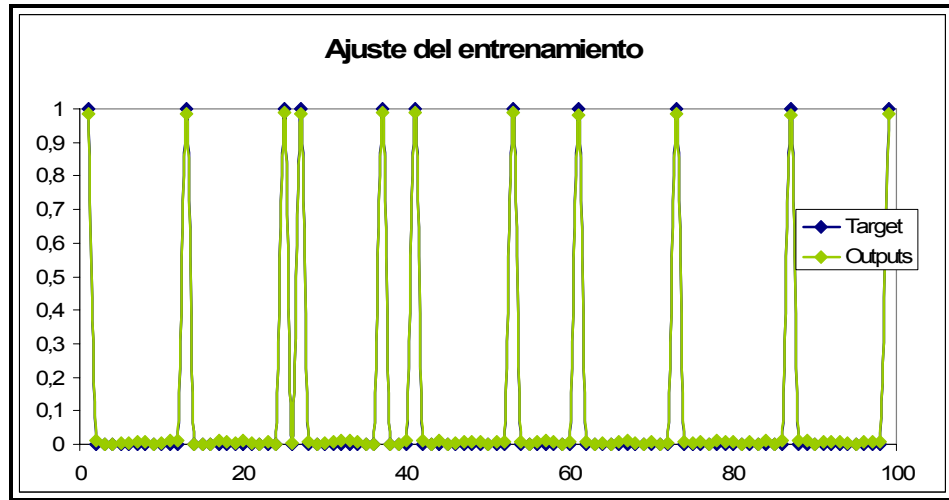
1. FUNCIONAMIENTO NORMAL SARTA NO ANCLADA
2. INTERFERENCIA DE GAS
3. -FUGA EN LA VALVULA FIJA
-BASURA QUE ATASCA LA AVERTURA DE LA VALVULA FIJA
4. -DAÑO EN LA VALVULA VIAJERA SIN ANCLA
-ACCION ERRATICA DE LA VALVULA VIAJERA
5. GOLPE DE FLUIDO
6. VARILLAS PARTIDAS
7. FUGA EN EL BARRIL
8. GOLPE ABAJO
9. ASFALTENOS EN LA BOMBA

De acuerdo a los problemas considerados para estas redes el número de neuronas de salida es nueve (9) como es descrito en el capítulo 4, cada neurona de salida corresponde a un problema a ser reconocido por la red.

La red **B1** corresponde a configuración 60:10:9, donde las 60 entradas corresponden a las coordenadas de carga al igual que la red A1.

En el entrenamiento de la red primero se tomo una tasa de aprendizaje de 0.1, con un error marginal de 0.1, además de criterios de otros criterios de parada que fueron modificados hasta obtener un error de 0.018077, con los siguientes resultados:

Figura 56. Visualización de resultados finales Red tipo B1

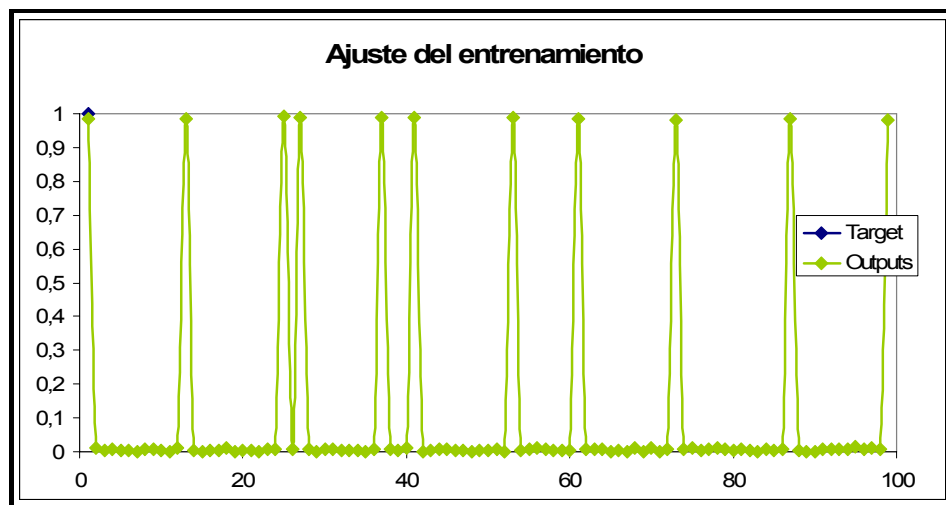


Fuente: Autores del Proyecto

Las graficas anteriores demuestran los buenos resultados que alcanza la red **B1** sobre los patrones de entrenamiento.

La **red B2** posee 120 neuronas de entrada que corresponden a las parejas X,Y (posición del pistón, carga soportada) de los 60 puntos significativos de un dinagrama de fondo, donde cada nodo de entrada corresponden a cada una de las coordenadas de la siguiente manera: X1 a N1, Y1 a N2, X2 a N3, Y2 a N4X60 a N119 y Y60 a N120; donde N corresponde a la neurona de entrada. En base a lo expuesto la red B2 tiene arquitectura 120:10:9 (120 nodos de entrada, 10 neuronas en la capa oculta y 9 nodos de salida). De acuerdo con el procedimiento realizado con las otras redes se obtuvo con la esta red un error de 0.0198517 y los siguientes resultados:

Figura 57. Visualización de resultados finales Red tipo B2



Fuente: Autores del Proyecto

Como puede observarse hasta aquí los resultados de ambas redes sobre los patrones de entrenamiento son muy similares y muy buenos, por lo tanto es necesario realizar una prueba como la realizada sobre las redes tipo A, con otros patrones que proporcionen elementos para valorar cada red. Estos nuevos patrones corresponden a dinagramas elaborados cuidadosamente con las formas ideales como en la prueba con las otras redes e involucran dos formas que representan problemas diferentes en diferentes regiones del dinagrama (ver sección 5.1). Los dinagrama prueba son 3. Estos dinagramas involucran cada uno dos problemas los cuales son respectivamente:

1. Golpe de fluido y escurrimiento por válvula viajera.
2. Compresión de gas y daño en la válvula viajera.
3. Golpe abajo con acción errática de la válvula viajera.

En las siguientes tablas se pueden observar las reapiestas de las redes a cada uno de los dinagramas prueba.

Tabla 12. Resultados fase de prueba de la Red B1.

	normal	int gas	sv	tv	fuga	Golpe de fluido	varillas partidas	gope abajo	asfaltenos
Golpe de fluido y escurrimiento	0,248108	0,032646	0,002063	0,005159	0,000441	0,91329	0,01483	0,000008	0,001187
Compresion de gas y escurrimiento tv erratica	0,093825	0,990755	0,00865	0,000933	0,005531	0,006003	0,066369	0,003342	0,000002
Golpe abajo con accion erratica de la tv	0,13798	0,016541	0,001008	0,000942	0,001276	0,000013	0,010579	0,862079	0,00045

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 13. Resultados fase de prueba de la Red B2.

	normal	int gas	sv	tv	fuga	Golpe de fluido	varillas partidas	gope abajo	asfaltenos
Golpe de fluido y escurrimiento	0,002085	0,006857	0,000087	0,02258	0,000211	0,605136	0,019167	0,00158	0,000749
Compresion de gas y escurrimiento tv erratica	0,008756	0,965462	0,004829	0,004402	0,00051	0,007329	0,019265	0,00331	0,000005
Golpe abajo con accion erratica de la tv	0,01022	0,001196	0,000422	0,017077	0,006311	0,001347	0,01311	0,951809	0,017257

Fuente: Autores del Proyecto

Los resultados anteriores muestran que las redes no pueden realizar el reconocimiento de más de un patrón, que red A1 es mucho más efectiva en el reconocimiento del golpe de fluido y de interferencia de gas, y además muestra que las diferencias en el reconocimiento de patrones entre las redes con 60 y 120 neuronas de entradas no son significativas. Con esto se concluye las serie de pruebas de sensibilidad de las entradas a la red neuronal, y se selecciona la arquitectura de la red de B1 ya que presenta mejores resultados y es más sencilla que la red B2, lo que cumple con la regla general de un proyecto Neurocomputacional que advierte que es esencial trabajar con la arquitectura mas sencilla y simple para obtener resultados óptimos y evitar hacer más complejo el problema.

5.4.2 Segunda Etapa. La segunda etapa comprende un trabajo de investigación y búsqueda de la mejor arquitectura y pruebas de sensibilidad del número de neuronas en la capa oculta y número de capas ocultas con el software MemBrain, en esta etapa se estudiaron diferentes arquitecturas para encontrar la más adecuada. En esta etapa los dinagramas prueba corresponden a dinagramas del Campo Escuela colorado, descritos como dinagramas de prueba segunda etapa en la sección 5.1. En La siguiente tabla muestran las topologías de red estudiadas en esta etapa.

Tabla 14. Arquitecturas de red evaluadas “sensibilidad de neurona y capas”.

1 capa oculta	2 capas ocultas	3 capas ocultas
60:10:9	60:12:10:9	60:30:16:10:9
60:20:10	60:20:10:9	60:35:15:10:9
60:30:11	60:20:15:9	60:30:20:10:9
60:40:12	60:16:10:9	60:40:20:10:9

Fuente: Autores del Proyecto

Estas pruebas de sensibilidad arrojaron las siguientes conclusiones y resultados:

- Respecto a las redes con 3 capas ocultas: Los resultados muestran que las redes identifican cualquier dinagrama de prueba como un dinagrama de una unidad que posee varillas partidas y algunas veces activándose más de una neurona de salida, pero no la correspondiente a los problemas implícitos en el dinagrama de prueba. Las redes en consecuencia con sus resultados muestran ser muy complejas para este tipo de tarea, pues muestran buenos resultados sobre los patrones de entrenamiento y malos sobre las pruebas.
- Respecto a las redes con 2 capas ocultas: Los resultados muestran que las redes identifican uno de los problemas involucrados en los dinagramas de prueba, pero en un porcentaje muy bajo con respecto a el reconocimiento que

se ha alcanzado hasta el momento con redes de una sola capa oculta, además algunas redes identifican dinagramas de prueba como un dinagramas de una unidad que posee varillas partidas. De esto se concluye que entre más sencilla la arquitectura de la red, se obtienen mejores resultados.

- Respecto a las redes con 1 capa oculta: Los resultados muestran que las redes identifican uno de los problemas involucrados en los dinagramas de prueba, sin embargo los resultados mejoran un poco al aumentar el número de neuronas en la capa oculta, estableciendo como numero limite de neuronas por encima del cual los resultados empeoran 20 neuronas en la capa oculta.
- Es necesario mantener una arquitectura sencilla de una capa oculta y realizar modificaciones diferentes a las de arquitectura si quiere llagar a reconocer más de un problema en un dinagrama.

Es importante señalar que estos resultados son validos exclusivamente para este tipo de problema y específicamente para la base de entrenamiento utilizada con las respectivas entradas y salidas a la red, por lo tanto si alguno de estos elementos fuera alterado posteriormente, es necesario investigar de nuevo la mejor arquitectura.

La modificación realizada para obtener mejores resultados trata de una reorganización de la base de datos de entrenamiento y adición de nuevos dinagramas de entrenamiento, estos nuevos dinagramas de entrenamiento corresponden a los dinagramas prueba sintéticos utilizados en la primera etapa, admitiéndolos como de entrenamiento ya que son dinagramas combinados elaborados a partir de los dinagramas ejemplo del Echometer. La organización de la base de datos de entrenamiento es una reclasificación y revisión de los dinagramas a ser utilizados en el entrenamiento de la red, la cual no incluyo el dinagrama sobre depositación de parafinas e incluyo la identificación de un problema de diseño que esta involucrado en los dinagramas del campo colorado

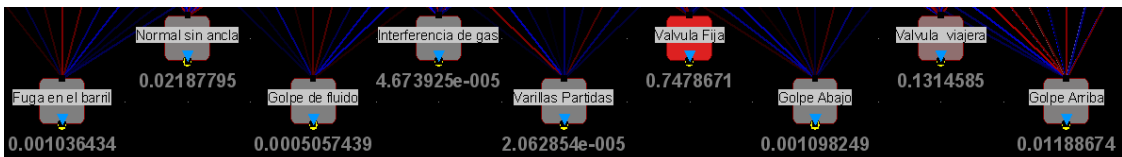
de prueba, este problema de diseño es conocido como golpe arriba. Por lo tanto la configuración usada para realizar este ejercicio es 60:10:9.

La prueba esta compuesta por 13 patrones de entrenamiento y 8 de prueba analizados por EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN DEL GAS Y DEL PETRÓLEO de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER para el Campo-Escuela Colorado.

Resultados de la prueba: Los resultados de la prueba son visualizados directamente en el software Membrain por cada dinagrama de prueba aprovechando la facilidad que presenta este para asignarle nombre a cada una de las neuronas de salida; de acuerdo con esto los resultados se mostraran por cada dinagrama de prueba con un “pantallazo” de las neuronas de salida.

El primer dinagrama de prueba corresponde a una bomba con problemas tanto en la válvula viajera como en la fija y los resultados presentados por la red son:

Figura 58. Visualización en Membrain Dinagrama prueba 1.

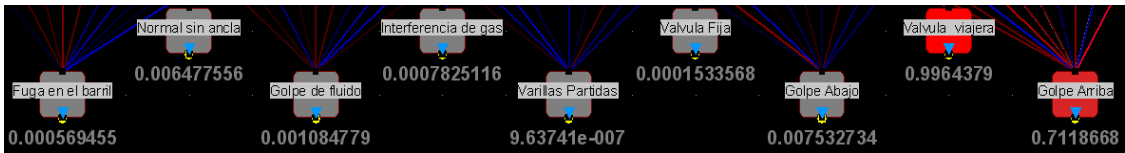


Fuente: MemBrain Neural Network Simulator .

La neurona de salida correspondiente a válvula fija (de color rojo), presenta un alor de salida de 0.7478 que significa que la bomba a la cual corresponda el dinagrama tiene una posibilidad de 74% de tener daños en válvula fija, mientras que la neurona de salida correspondiente a válvula viajera arroja un valor de 0.1314, que significa que la bomba a la cual corresponda el dinagrama tiene una posibilidad de 13% de tener daños en válvula fija.

El segundo dinagrama de prueba corresponde a una bomba con problema en la válvula viajera. Los resultados presentados por la red son:

Figura 59. Visualización en Menbrain Dinagrama prueba 2.

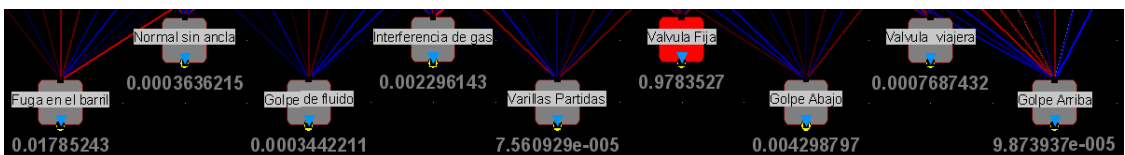


Fuente: MemBrain Neural Network Simulator .

La neurona de salida correspondiente a válvula viajera, presenta un valor de salida de 0.9964 que significa que la bomba a la cual corresponda el dinagrama tiene una posibilidad de 99% de tener daños en válvula viajera, mientras que la neurona de salida correspondiente a mal espaciamento o golpe arriba arroja un valor de 0.7118, que significa que la bomba a la cual corresponda el dinagrama tiene una posibilidad de 71% de poseer un problema debido al mal diseño, este ultimo problema no fue diagnosticado en el informe presentado por el centro de investigación del gas y del petróleo, pero el dinagrama presenta un pequeño salto brusco al terminar la carrera ascendente que puede significar esto.

El tercer dinagrama de prueba corresponde a una bomba con problemas en la válvula fija y de mal diseño (golpe arriba). Los resultados presentados por la red son:

Figura 60. Visualización en Menbrain Dinagrama prueba 3.

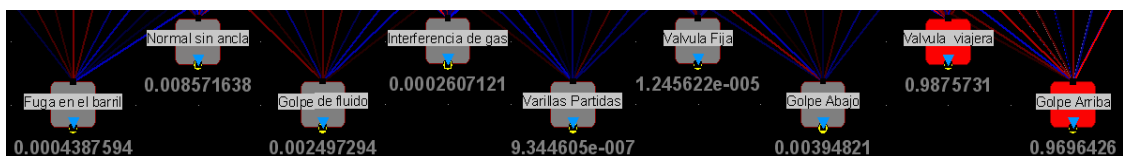


Fuente: MemBrain Neural Network Simulator .

La neurona de salida correspondiente a válvula fija (de color rojo), presenta un valor de salida de 0.9783 que significa que la bomba a la cual corresponda el dinagrama tiene una posibilidad de 97% de tener daños en válvula fija, mientras que la neurona de salida correspondiente a mal espaciado o golpe arriba arroja un valor despreciable, que significa que la red no reconoce perfectamente este inconveniente.

El cuarto dinagrama de prueba corresponde a una bomba con problemas en la válvula viajera y de mal diseño (golpe arriba). Los resultados presentados por la red son:

Figura 61. Visualización en MemBrain Dinagrama prueba 4.

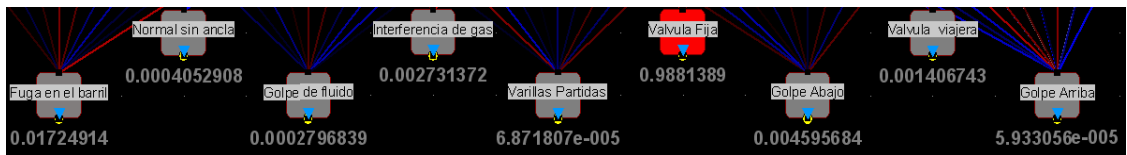


Fuente: MemBrain Neural Network Simulator

La neurona de salida correspondiente a válvula viajera, presenta un valor de salida de 0.9875 que significa que la bomba a la cual corresponda el dinagrama tiene una posibilidad de 9875% de tener daños en válvula viajera, mientras que la neurona de salida correspondiente golpe arriba arroja un valor de 0.9696, que significa que la bomba a la cual corresponda el dinagrama tiene una posibilidad de 96% de estar mal espaciada.

El quinto dinagrama de prueba corresponde a una bomba con problemas en la válvula fija y de mal diseño (golpe arriba). Los resultados presentados por la red son:

Figura 62. Visualización en MemBrain Dinagrama prueba 5.

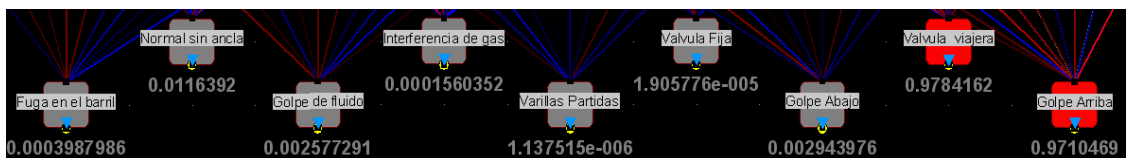


Fuente: MemBrain Neural Network Simulator

La neurona de salida correspondiente a válvula fija (de color rojo), presenta un valor de salida de 0.9881 que significa que la bomba a la cual corresponda el dinagrama tiene una posibilidad de 98% de tener daños en válvula fija, mientras que la neurona de salida correspondiente a mal espaciado o golpe arriba arroja un valor despreciable, que significa que la red no reconoce perfectamente este inconveniente.

El sexto dinagrama de prueba corresponde a una bomba con posibles problemas en la válvula viajera y de mal diseño (golpe arriba), pero en el reporte se señala que de acuerdo a otras pruebas esta funcionando normalmente. Los resultados presentados por la red son:

Figura 63. Visualización en MemBrain Dinagrama prueba 6.

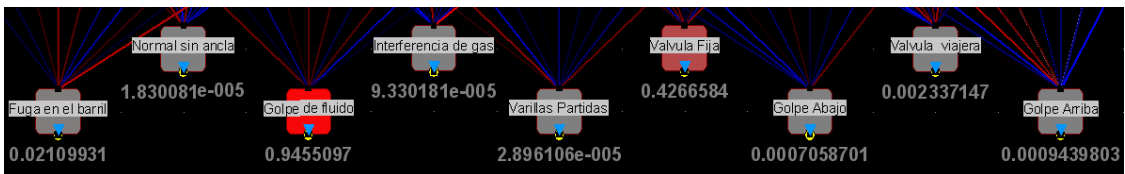


Fuente: MemBrain Neural Network Simulator

La neurona de salida correspondiente a válvula viajera, presenta un valor de salida de 0.9784 que significa que la bomba a la cual corresponda el dinagrama tiene una posibilidad de 97% de tener daños en válvula viajera, mientras que la neurona de salida correspondiente golpe arriba arroja un valor de 0.9710, que significa que la bomba a la cual corresponda el dinagrama tiene una posibilidad de 97% de estar mal espaciada.

El séptimo dinagrama de prueba corresponde a una bomba con problemas de golpe de fluido y golpe de fondo, pero en el reporte no de tubo en cuenta la parte inferior izquierda del dinagrama de fondo que presenta lo que puede significar un problema por válvula fija. Los resultados presentados por la red son:

Figura 64. Visualización en MemBrain Dinagrama prueba 7.

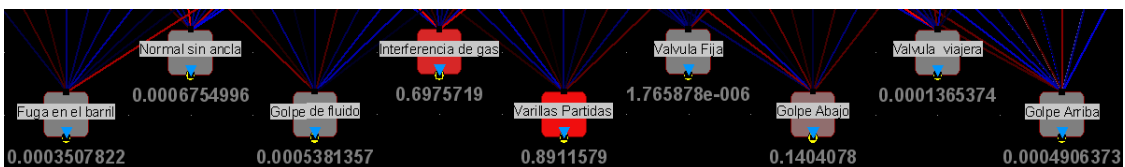


Fuente: MemBrain Neural Network Simulator

La neurona de salida correspondiente a válvula fija (de color rojo izquierda), presenta un valor de salida de 0.4266 que significa que la bomba a la cual corresponda el dinagrama tiene una posibilidad de 46% de tener daños en válvula fija, mientras que la neurona de salida correspondiente golpe de fluido arroja un valor de 0.9455, que significa que la bomba a la cual corresponda el dinagrama tiene una posibilidad de 94% de presentar disminución del nivel de fluido y golpe de fluido, la neurona de salida correspondiente a golpe abajo arroja un valor despreciable, que significa que la red no reconoce perfectamente este problema.

El octavo dinagrama de prueba corresponde a una bomba con las varillas partidas. Los resultados presentados por la red son:

Figura 65. Visualización en MemBrain Dinagrama prueba 8.



Fuente: MemBrain Neural Network Simulator .

La neurona de salida correspondiente a varillas partidas (de color rojo derecha), presenta un valor de salida de 0.8911 que significa que la bomba a la cual corresponda el dinagrama tiene una posibilidad de 89% de tener las varillas partidas, mientras que la neurona de salida correspondiente a interferencia de gas arroja un valor de 0.6975, que significa que la bomba a la cual corresponda el dinagrama tiene una posibilidad de 69% de poseer un problema debido a interferencia de gas. Este último problema no fue diagnosticado en el informe presentado por el centro de investigación del gas y del petróleo, pero el dinagrama presenta sin embargo un espacio de carga de la bomba con una caída constante de carga en el inicio de la carrera descendente lo cual se asemeja a un problema de interferencia por gas.

Los resultados son considerablemente buenos teniendo en cuenta que se está logrando identificar dos problemas involucrados en una carta dinamométrica de una manera aceptable, demostrando que las modificaciones sobre la base de datos de entrenamiento son acertadas.

5.5 APLICACIÓN AL CAMPO-ESCUELA COLORADO.

En este punto ya se ha realizado el seguimiento de las pruebas que demuestran que las redes neuronales pueden realizar correctamente diagnósticos sobre dinagramas de fondo, esto ha sido un estudio general de la aplicación y para aplicar esta herramienta al análisis de un campo petrolero específico se debe realizar un estudio detallado sobre el campo que delimitará las características de la red neuronal.

5.5.1 Generalidades. El Campo Colorado está localizado en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) en la Provincia Estructural del Piedemonte Occidental de la Cordillera Oriental, al sureste del municipio de Barrancabermeja (Santander) y del sur del Campo La Cira - Infantas, entre coordenadas X=

1'036.000 - 1'040.500 Este y Y = 1'238.000 – 1'.247.500 Norte con origen Bogotá, en el área de la antigua concesión De Mares.

El petróleo del Campo Colorado se extrae principalmente de la Formación Mugrosa (Zonas B y C) y Esmeraldas (Zona D) de edad Oligoceno – Mioceno inferior, depositada en un sistema fluvial meándrico. La trampa está conformada por un anticlinal elongado en dirección norte-sur limitado por una falla inversa al oeste en sentido N-S y que buza hacia el este y dividido en siete bloques por fallas satélites SW-NE.

Las areniscas de la Formación Mugrosa se dividen en cuatro unidades operacionales en el Campo Colorado con una porosidad promedio de 12.9 % para la Zona B1, 13.5% para B2, 15.7% para C1 y 19.6% para C2, con un espesor promedio de arena neta petrolífera de 21.8, 23.2, 24.9 y 42.3 pies, respectivamente.

Las acumulaciones son de aceite liviano y gas con gravedad de 36 a 42 °API. Se tiene reportada una presión inicial de 506 psia en la Zona B a 1900 pies MD y 2208 psia en la Zona C. La máxima producción fue de 1765 BOPD en noviembre de 1961 hasta llegar a un valor de 430 BOPD en junio de 1966. A diciembre de 2003 se han extraído 8.57 MMBO con un corte de agua mínimo.

El mecanismo de producción predominante es empuje por gas en solución. El aceite original estimado es de 121 MMBls y las reservas primarias producidas son de 8.57 MMBls con un factor de recobro actual de 7.024%. El yacimiento presenta poca continuidad lateral en los cuerpos arenosos, que unido a la baja energía del yacimiento y sus arenas delgadas (por debajo de los 20 pies de espesor) hace que la producción acumulada de los pozos este muy por debajo de los 300.000 Bls.

El campo cuenta con 75 pozos perforados, actualmente tiene 5 pozos activos con una producción entre 20 BOPD y 30 BOPD y una declinación actual de 15%

efectivo anual. Históricamente el campo ha presentado problemas de taponamiento por parafinas tanto en las líneas como en la tubería de producción en el pozo. Las oportunidades de desarrollo adicional rentables son pocas, debido al bajo potencial de aceite incremental esperado y a los continuos trabajos de control de parafinas a realizar. No obstante, es factible realizar los análisis económicos con métodos alternativos de levantamiento artificial que impidan la precipitación de las parafinas y se puedan disminuir los costos de recuperar los pozos abandonados.

5.5.2 Problemas Relacionados Con La Producción Del Campo Colorado. En el campo Colorado, como en cualquier otro campo petrolero se tienen una gran cantidad de problemas que disminuyen la producción total con respecto al potencial del mismo, no obstante, siendo el problema de manejo de la parafinas algo crítico para la producción bajo condiciones económicas, nos referimos a el de una manera especial.

PROBLEMAS DE PARAFINAS

Las moléculas de parafina están conformadas por cadenas literales de alcanos, de muy pocas ramificaciones, junto con los asfáltenos se encuentran presentes en la mayoría de los crudos y pueden depositarse por cambios termodinámicos o químicos que ocurren durante la explotación de un yacimiento. Los fenómenos que favorecen la precipitación de las parafinas en los pozos productores son: el enfriamiento por expansión de gas, por la inyección de fluidos fríos dentro de las formaciones que contienen crudos parafinados y la pérdida de volátiles.

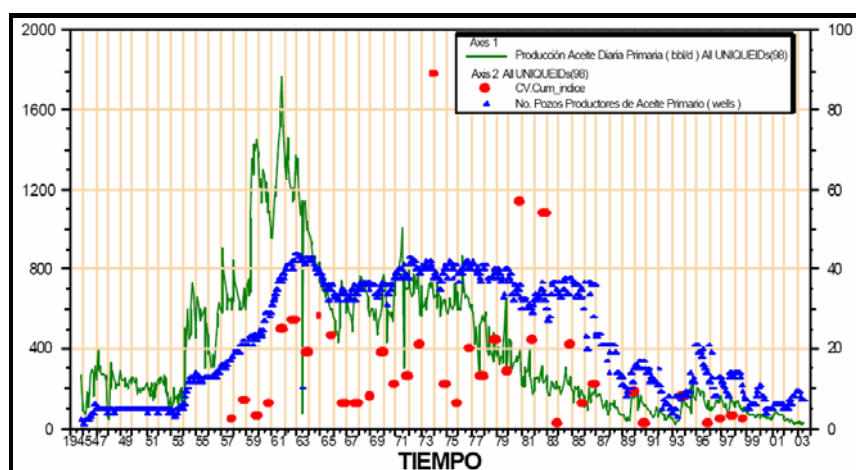
Las parafinas se pueden precipitar en instalaciones de superficie, en los sistemas de levantamiento y en la formación, cuando la caída de presión en las cercanías del pozo es muy alta, lo cual induce la evaporación acelerada de volátiles del crudo y la posterior precipitación de la parafina.

PROBLEMA DE PARAFINAS EN EL CAMPO COLORADO.

En el estudio denominado llamado “Diagnóstico Y Estrategias De Recobro Campo Colorado. El Centro, Diciembre de 2003” presentado por ECOPETROL Gerencia Magdalena Medio e Instituto Colombiano Del Petróleo a la Universidad Industrial de Santander se realizó un análisis estadístico de los pozos que presentan problemas de parafinas, encontrándose que después de los años setenta, el control de la parafina se realizó con la inyección de Aceite Caliente en la tubería de producción. El análisis estadístico calculó los promedios de las acumulaciones de petróleo y los acumulados de los días activos por completamiento, según estos promedios tenemos que cada 8.65 Mil barriles de aceite producido y 547.79 días activos se reporta un problema de parafina, indicando que el depósito de parafina en las tuberías de producción es bastante frecuente.

En la grafica que encontramos a continuación, tenemos la producción del campo Colorado contra el número de trabajos de parafina que se le han realizado a los pozos anualmente y el número de pozos, de esta grafica podemos observar como ha influenciado la parafina en la producción del campo.

Figura 66. Trabajos de Remoción de Parafina en el Campo Colorado.



Fuente: Diagnóstico Y Estrategias De Recobro Campo Colorado. El Centro, Diciembre de 2003

En la gráfica encontramos que el número de pozos activos ha disminuido drásticamente desde 1987, los trabajos de control de parafina se han llevado al mínimo, con las consecuentes pérdidas de producción en el campo. Este problema se ha manejado inyectando aceite caliente en las líneas de Superficie y baches de químicos por el anular del pozo recirculados a través del equipo de subsuelo. Se espera que con un mantenimiento preventivo adecuado tanto en el equipo de subsuelo como en las líneas de superficie se pueda manejar este problema tan crítico para la operación del campo.

5.5.3 Principales Problemas presentados en el equipo de subsuelo de las unidades de bombeo mecánico en Colorado.

Además del problema crítico existente de depositación de parafinas, existen diversos problemas o situaciones de anormalidad presentados en el equipo de subsuelo de las unidades de bombeo mecánico del campo colorado, estos problemas se pueden presentar por diversas razones, entre las cuales esta, fallas en las varillas de la unidad, basura, presencia de gas, entre otras. En la siguiente tabla podemos observar las diferentes situaciones más comúnmente presentadas en el campo.

Tabla 15. Situaciones comunes en los equipos de subsuelo de las unidades de bombeo mecánico del campo colorado.

OTROS PROBLEMAS O SITUACIONES PRESENTADOS EN COLORADO
MAL FUNCIONAMIENTO DE LA VALVULA VIAJERA (TV)
MAL FUNCIONAMIENTO DE LA VALVULA FIJA (SV)
GOLPE ABAJO
GOLPE ARRIBA
VARILLAS PARTIDAS
GOLPE FLUIDO
INTERFERENCIA DE GAS

Fuente: Autores del Proyecto.

Entre las anteriores existe una que en particular, no es producto de un mal funcionamiento o de un agente dinámico como pueden ser las otras, esta es la situación denominada por nosotros como golpe arriba. Esta situación es producto del mal espaciado entre el pistón y el tope de la bomba, por lo tanto se presenta un golpeteo generalmente al final de la carrera ascendente, la situación de mal espaciado, no es inducida por algún agente dinámico durante la operación de la bomba, si no que es causada por error humano en el diseño de la unidad, por lo tanto se trata no de un problema a considerar dinámico, si no una situación crítica de mal diseño.

Las situaciones denominadas como mal funcionamiento de la válvula viajera y mal funcionamiento de la válvula fija, se pueden presentar por diferentes situaciones como por ejemplo presencia de cristales de parafinas o basura que impidan el cierre de la válvula y picaduras por algún agente corrosivo.

La situación llamada interferencia se presenta por la presencia de gas y disminución del nivel de fluido por debajo de la altura máxima de la válvula viajera, por lo tanto al comenzar la carrera descendente, la válvula viajera no entra en contacto con el fluido, permaneciendo cerrada, comprimiendo el gas y abriéndose cuando la presión del gas comprimido sea suficiente para permitirselo, o al alcanzar el nivel de fluido.

La situación llamada golpe de fluido se presenta cuando existe disminución del nivel de fluido por debajo de la altura máxima de la válvula viajera y no hay presencia de gas considerable, por lo tanto al comenzar la carrera descendente, la válvula viajera no entra en contacto con el fluido, permaneciendo cerrada y abriendo abruptamente cuando entra en contacto con el fluido.

La situación de varillas partidas se puede presentar por esfuerzos considerables de carga en la carrera ascendente, por estrés y fatiga de las varillas, por mal cálculo en la carga a soportar por las varillas, entre otras.

5.5.4 Topología de la red. La topología de la red utilizada en esta aplicación de acuerdo con los estudios previos realizadas y acorde con la metodología establecida, es una red de 60 entradas que corresponden a las coordenadas de carga de los 60 puntos significativos de cada dinagrama y 9 salidas que corresponden al número de problemas a diagnosticar en el campo colorado. El número de neuronas en la capa oculta se establece en la etapa de entrenamiento y optimización de la red. Cada neurona de salida corresponde a un problema a identificar y están organizadas de la siguiente manera:

Neurona 1: Funcionamiento Normal de la bomba

Neurona 2: Interferencia por Gas

Neurona 3: Mal funcionamiento de la válvula fija

Neurona 4: funcionamiento de la válvula viajera

Neurona 5: Presencia de parafina en la bomba

Neurona 6: Golpe de fluido

Neurona 7: Varillas partidas

Neurona 8: Golpe al final del recorrido descendente (golpe abajo)

Neurona 9: Golpe al final de la carrera ascendente (golpe arriba)

Las neuronas de salida tienen como función de transferencia la función logística o sigmoideal, y cualquier neurona de la capa oculta tiene la función Tangsigmoideal.

5.5.5 Dinagramas de entrenamiento, prueba y predicción.

Dinagramas De Entrenamiento

Los dinagramas de entrenamiento corresponden a 17 dinagramas entre ejemplos del Echometer y sintéticos elaborados con base en los ejemplos del Echometer y a comportamientos observados en una previa revisión de los problemas del Campo Escuela Colorado, descrita en la sección anterior, además este conjunto de dinagramas de entrenamiento son el resultado de estudios detallados realizados en el entrenamiento optimización de la red.

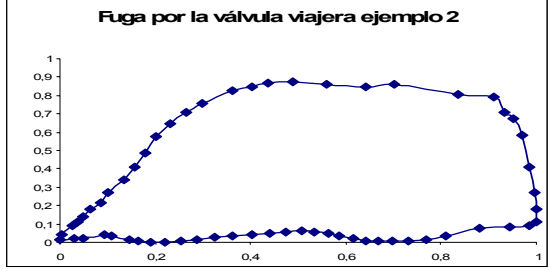
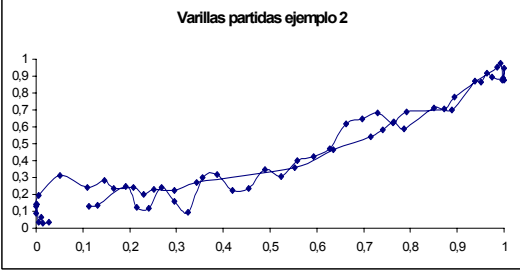
Tabla 16. Dinagramas utilizados para el entrenamiento de la red neuronal aplicada al Campo Escuela Colorado.

DINAGRAMAS DE ENTRENAMIENTO
Funcionamiento Normal con tubería no anclada
Interferencia de Gas
Problemas de Fuga por la válvula fija
Problemas de Fuga por la válvula viajera ejemplo 1
Problemas de Fuga por la válvula viajera ejemplo 2
Golpe de fluido
Varillas partidas ejemplo 1
Varillas partidas ejemplo 2
Parafinas y/o asfaltenos
Parafina y válvula viajera
Golpe Abajo
Válvula viajera y válvula Fija
Válvula viajera y golpe arriba
Válvula viajera y Golpe de Fluido
Válvula viajera y Golpe en el Fondo
Golpe Arriba ejemplo 1
Golpe Arriba ejemplo 2

Fuente: Autores del Proyecto.

El número de dinagramas y su descripción se encuentran en la tabla 18, los dinagramas resaltados son dinagramas elaborados sintéticamente o manualmente, algunos a partir de los ejemplo del echemeter y otros creados completamente, estos dinagramas sintéticos involucraran formas y casos de los cuales no se poseen ejemplos. Los dinagramas de entrenamiento pueden observarse en la tabla “Patrones de entrenamiento etapa 1” teniendo en cuenta que los dinagramas de fuga en el barril y golpe abajo no se involucran en esta aplicación; y que la tabla complementaria que muestra los demás dinagramas se encuentra a continuación.

Tabla 17. Dinagramas de entrenamiento para la aplicación en el Campo-Escuela Colorado.

INTERPRETACION	DINAGRAMA
<p>Fuga por válvula viajera ejemplo 2</p>	
<p>Varillas partidas ejemplo 2</p>	

<p>Presencia de parafina y fuga por válvula viajera</p>	
<p>Golpe al final de la carrera descendente.</p>	
<p>Fuga en por daño en ambas válvulas (Fija y Viajera).</p>	
<p>Fuga por válvula viajera y Golpe al final de la carrera ascendente.</p>	
<p>Fuga por válvula viajera y golpe de fluido</p>	

<p>Fuga por válvula viajera y Golpe al final de la carrera descendente.</p>	
<p>Golpe al final de la carrera ascendente.</p>	
<p>Golpe al final de la carrera ascendente ejemplo 2.</p>	

Fuente: Autores del Proyecto.

Dinagramas de prueba

Los dinagramas prueba corresponden a 8 dinagramas de los pozos 36 y 37, evaluados por el CENTRO DE INVESTIGACIÓN DEL GAS Y DEL PETRÓLEO de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER y por ECOPETROL S.A para el Campo Escuela Colorado.

Pozo 37 Octubre 9 del 2006.

Interpretación: Del registro se observa que el pozo tiene una capacidad de extracción instalada de 32.2 BPD. La carta dinamoétrica de fondo muestra un llenado de 99.8%. La velocidad de bombeo es 9.73 strokes por minuto (SPM). Las cargas máxima y mínima sobre la barra lisa son 7571 y 6107 libras respectivamente. La prueba de válvulas muestra fuga severa en la válvula viajera

y retardo en el cierre de la válvula fija. Problemas que se observan mejor si se mira el dinagrama de fondo normalizado.

Figura 67. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.



Fuente: Autores del Proyecto.

Pozo 36 Octubre 9 del 2006.

Interpretación: Del registro se observa que el pozo tiene una capacidad de extracción instalada de 29.1 BPD. La carta dinamoétrica de fondo muestra un llenado de 15.5%. La velocidad de bombeo es 10.29 strokes por minuto (SPM). Las cargas máximas y mínima sobre la barra lisa son 2666 y 2161 libras respectivamente. La prueba de válvula muestra fuga severa en la válvula viajera. En la figura 68 se presentan los resultados obtenidos.

Figura 68. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.



Fuente: Autores del Proyecto.

Pozo 36 junio 8 del 2006.

Interpretación: De la prueba dinamométrica se concluye que la bomba presenta un llenado del 95%, esta en capacidad de desplazar 27 barriles por día, los strokes actuales a los que opera la unidad son de 10.29 por minuto y que la bomba presenta un pequeño golpe al final de la carrera ascendente además que la válvula viajera funciona mal.

Figura 69. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.



Fuente: Autores del Proyecto.

Pozo 36 Julio 1 del 2006.

Interpretación: De la prueba dinamométrica se concluye que la bomba presenta un llenado del 89.5%, esta en capacidad de desplazar 25.4 barriles por día, los strokes actuales a los que opera la unidad son de 10.23 por minuto y que la carta indica que la válvula viajera presenta fuga.

Figura 70. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.



Fuente: Autores del Proyecto.

Pozo 37 Julio 1 del 2006.

Interpretación: La carta dinamométrica nos indica que la bomba presenta un llenado del 85%, bajo estas condiciones la bomba esta en capacidad de desplazar 26.6 barriles por día, la unidad opera a 9.73 strokes por minuto y que la carta nos indica posible presencia de parafina que delimita el buen desempeño de la bomba, además la válvula viajera presenta fuga.

Figura 71. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.



Fuente: Autores del Proyecto.

Los siguientes dinagramas de prueba no poseen interpretación realizada por las dos organizaciones anteriormente nombradas, sin embargo su interpretación es acorde con la fundamentación teórica necesaria para hacer este tipo de análisis.

Pozo 36 Abril 25 2002.

Interpretación: Las cartas indican que la válvula viajera presenta fuga severa, además de un leve golpe al final de la carrera descendente.

Figura 72. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.



Fuente: Autores del Proyecto.

Pozo 37 Agosto 23 2002.

Interpretación: La carta dinamométrica nos indica que la bomba presenta posible presencia de parafina que delimita su buen desempeño y que la válvula viajera presenta fuga.

Figura 73. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.



Fuente: Autores del Proyecto.

Pozo 37 Marzo 20 del 2003.

Interpretación: De acuerdo con el registro se presenta un problema de cierre en la válvula viajera que puede ser por posible presencia de parafina.

Figura 74. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.



Fuente: Autores del Proyecto.

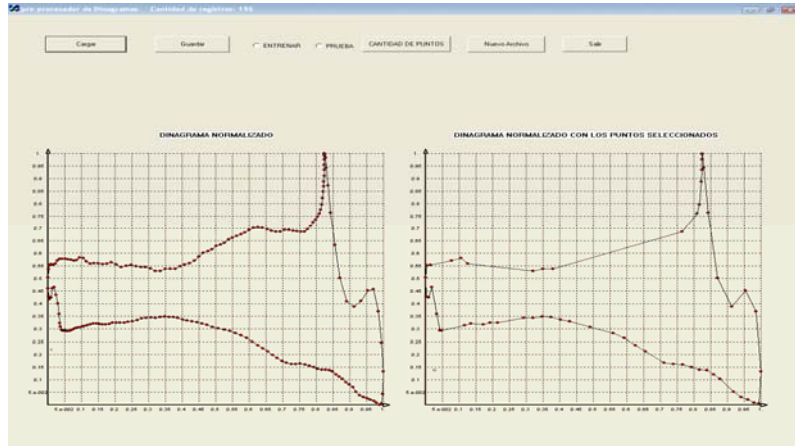
Dinagramas de predicción.

Los dinagramas predicción corresponden a 12 dinagramas de los pozos 38, 55, 69, 70, 74 y 75, evaluados por el CENTRO DE INVESTIGACIÓN DEL GAS Y DEL PETRÓLEO de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER y por ECOPETROL S.A.

Pozo 38 Febrero 2 del 2007

Interpretación: el dinagrama nos muestra que el pistón golpea el barril al final de la carrera ascendente y también se presentan posibles fallas en las dos válvulas.

Figura 75. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.

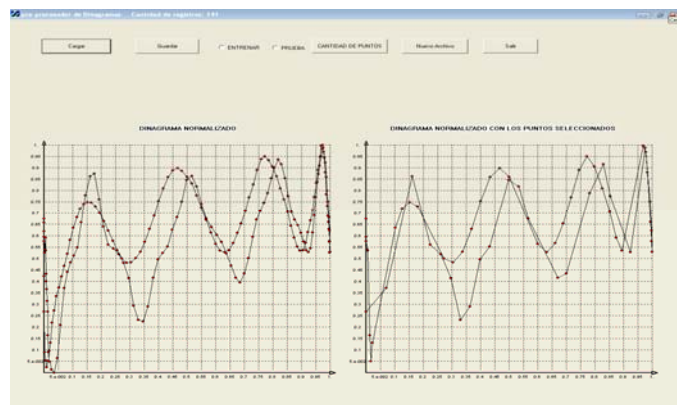


Fuente: Autores del Proyecto.

Pozo 69 abril 25 del 2002

Interpretación: la carta de fondo de pozo muestra el comportamiento típico de un sistema con sarta rota y La prueba de válvulas muestra que las dos válvulas están soportando la misma carga lo cual es un caso típico de varilla partida.

Figura 76. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.



Fuente: Autores del Proyecto.

Pozo 69 julio 1 del 2006

Interpretación: La carta dinamométrica nos indica que la varilla está rota, lo cual se comprueba con la prueba de válvulas

Figura 77. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.

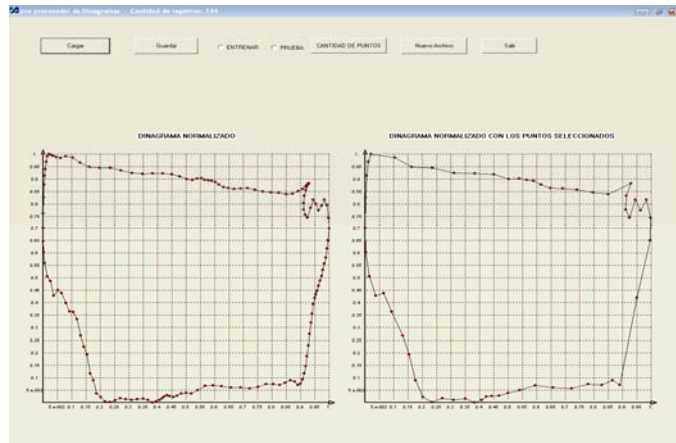


Fuente: Autores del Proyecto.

Pozo 70 junio 8 del 2006

Interpretación: la carta dinamométrica nos indica que la bomba presenta un golpe al final de la carrera ascendente y, además, la válvula fija parece presentar problemas de funcionamiento. Por lo que se procede a hacer una prueba de válvulas donde indica que la válvula fija sobrepasa la carga que debería estar soportando.

Figura 78. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.



Fuente: Autores del Proyecto.

Pozo 74 abril 25 2002

Interpretación: el dinagrama nos muestra un caso típico de varillas partidas.

Figura 79. Análisis del Pre-procesador, Ala izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.



Fuente: Autores del Proyecto.

Pozo 75 julio 1 del 2006

Interpretación: del registro dinamométrico se puede decir que se presenta un alto nivel de fluido sobre la bomba y posible fuga en la válvula viajera.

Figura 80. Análisis del Pre-procesador, A la izquierda dinagrama normalizado, a la derecha dinagrama elaborado con los 60 puntos significativos.



Fuente: Autores del Proyecto.

5.5.6 Entrenamiento y Optimización. Debido a que la aplicación específica sugiere cambios sobre los problemas a identificar con la red neuronal artificial y por lo tanto en la base de datos de entrenamiento sobre la que se venía trabajando, fue necesario realizar modificaciones mientras se realizo el entrenamiento que permitieron optimizar los resultados de la red. Las modificaciones más importantes sobre una base de datos de entrenamiento que incluía más de 22 dinagramas fueron realizadas teniendo en cuenta los siguientes principios.

- Selección de dinagramas básicos sobre problemas o situaciones.
- Cuantificación de las salidas de la red de acuerdo al dinagrama.

- Elaboración de dinagramas combinados acorde a los problemas presentados en el campo.
- Preselección de dinagramas de un mismo problema estableciendo su utilidad o de lo contrario el procesamiento de estos como un solo problema se hace más complejo para la red.

Sensibilidad de neuronas y capas.

Para determinar si la metodología a utilizar es la correcta se procedió a hacer una serie de pruebas para corroborar este hecho, las pruebas se enfocaron hacia el comportamiento de la red cuando se cambian algunos parámetros, y en este caso los parámetros o variables fueron la cantidad de neuronas en la capa oculta y la cantidad de capas ocultas.

Las siguientes tablas son los resultados arrojados por la red en el reconocimiento de patrones con diferentes topologías, los resultados aunque fueron malos nos sirvió para ratificar la topología que estábamos utilizando, debido a que se logro un mejor reconocimiento de los patrones.

Las tablas arrojan información concerniente a la topología, el patrón que esta siendo evaluado, la interpretación real de el dinagrama, y la interpretación que hace la red sobre este dinagrama. Lo que se busca es que la interpretación de la red sea igual o muy aproximada a la interpretación real. Cada cuadro donde se encuentran los valores entre 0 y 1 son las salidas que posee la red, siendo estos los valores mínimo y máximo respectivamente; en este caso hemos puesto cero en las salidas que arrojan resultados por debajo de el 10% o 0.1, para no llenar la tabla con resultados insignificantes.

Tabla 18. Pruebas

TOPOLOGIA: 60:15:9		INTERPRETACION DE LA RED								
Patrón	Interpretación	Normal	Interferencia De gas	SV	TV	Parafina	Golpe de fluido	Varillas partidas	Golpe abajo	Golpe arriba
1	Daño en la TV y SV	0	0	0.8611	0	0	0	0	0	0
2	Daño en la TV	0	0	0	0.9999	0	0	0	0	0
3	Daño en la TV y Golpe arriba	0	0	0	0.9788	0	0	0	0	0.9366
4	Daño en la TV	0	0	0	0.9997	0	0	0.7351	0	0
5	Daño en la TV y Parafina	0	0	0	0.9995	0	0	0	0	0
6	Daño en TV y Golpe abajo.	0	0	0	0.9055	0.7058	0	0	0	0
7	Daño en TV, SV y Parafina	0	0	0.3337	0.9975	0.1246	0	0	0	0
8	Daño en la TV y parafina	0	0	0	0.7313	0.9321	0	0	0	0
# Iter: 8674							Error: 0.00984			

TOPOLOGIA: 60:20:9		INTERPRETACION DE LA RED								
Patrón	Interpretación	Normal	Interferencia De gas	SV	TV	Parafina	Golpe de fluido	Varillas partidas	Golpe abajo	Golpe arriba
1	Daño en la TV y SV	0	0	0.9293	0,1917	0	0	0	0	0
2	Daño en la TV	0	0	0	0.9999	0	0	0	0	0
3	Daño en la TV y Golpe arriba	0	0	0	0.6418	0	0	0	0.8100	0.4042
4	Daño en la TV	0	0	0	0.9851	0	0	0	0.8576	0
5	Daño en la TV y Parafina	0	0	0	0.9999	0.4843	0	0	0	0
6	Daño en TV y Golpe abajo.	0	0	0	0.5762	0.1042	0	0.9909	0	0
7	Daño en TV, SV y Parafina	0	0	0.1260	0.9983	0.8024	0	0	0	0
8	Daño en la TV y parafina	0	0	0	0.8976	0.9766	0	0	0	0
# Iter: 9235							Error: 0.00967			

TOPOLOGIA: 60:25:9		INTERPRETACION DE LA RED								
Patrón	Interpretación	Normal	Interferencia De gas	SV	TV	parafinas	Golpe de fluido	Varillas partidas	Golpe abajo	Golpe arriba
1	Daño en la TV y SV	0	0	0.9448	0.1545	0.2360	0	0	0	0
2	Daño en la TV	0	0	0	0.9999	0	0	0	0	0
3	Daño en la TV y Golpe arriba	0	0	0	0.9875	0	0	0	0	0
4	Daño en la TV	0	0	0	0.9758	0	0	0	0.5950	0
5	Daño en la TV y Parafina	0	0	0.1160	0.9511	0	0	0	0	0
6	Daño en TV y Golpe abajo.	0.1041	0	0	0	0.3331	0	0	0.8476	0
7	Daño en TV, SV y Parafina	0	0	0.1804	0.7641	0	0	0	0	0
8	Daño en la TV y parafina	0	0	0	0.7313	0.9321	0	0	0	0
# Iter: 7326							Error: 0.00886			

TOPOLOGIA: 60:30:9		INTERPRETACION DE LA RED								
Patrón	Interpretación	Normal	Interferencia De gas	SV	TV	parafinas	Golpe de fluido	Varillas partidas	Golpe abajo	Golpe arriba
1	Daño en la TV y SV	0	0	0.6811	0	0.2947	0	0	0	0
2	Daño en la TV	0	0	0	0.9999	0	0	0	0	0
3	Daño en la TV y Golpe arriba	0	0	0	0.9936	0	0	0	0	0.3243
4	Daño en la TV	0	0	0	0.9639	0	0	0	0	0
5	Daño en la TV y Parafina	0	0	0	0.9995	0	0	0	0	0
6	Daño en TV y Golpe abajo.	0	0	0	0.8583	0.9035	0	0	0	0.3864
7	Daño en TV, SV y Parafina	0	0	0	0.9997	0	0	0	0	0
8	Daño en la TV y parafina	0	0	0	0.9673	0.8898	0	0	0	0
# Iter: 8945							Error: 0.00913			

TOPOLOGIA: 60:15:10:9		INTERPRETACION DE LA RED								
Patrón	Interpretación	Normal	Interferencia De gas	SV	TV	parafinas	Golpe de fluido	Varillas partidas	Golpe abajo	Golpe arriba
1	Daño en la TV y SV	0	0	0.9574	0	0	0	0	0	0
2	Daño en la TV	0	0	0	0.9993	0	0	0	0	0
3	Daño en la TV y Golpe arriba	0	0	0	0.8840	0	0	0	0	0
4	Daño en la TV	0	0	0	0.9420	0	0	0	0.9037	0
5	Daño en la TV y Parafina	0	0	0	0.9997	0	0	0	0	0
6	Daño en TV y Golpe abajo.	0	0	0	0.3774	0.9035	0	0	0	0.3864
7	Daño en TV, SV y Parafina	0	0	0	0.9997	0	0	0	0	0
8	Daño en la TV y parafina	0	0	0	0.9673	0.8898	0	0	0	0
# Iter: 16329							Error: 0.00913			

Fuente: Autores del Proyecto.

Teniendo en cuenta la mejora de as pruebas anteriores y realizando una sensibilidad más detallada, encontramos la red neuronal que mejor se ajusto a nuestra tarea de identificación de los problemas del campo colorado, la red 60:10:9.

Tabla 19. Resultados Topología seleccionada

TOPOLOGIA: 60:10:9		INTERPRETACION DE LA RED								
Patrón	Interpretación	Normal	Interferencia De gas	SV	TV	Parafina	Golpe de fluido	Varillas partidas	Golpe abajo	Golpe arriba
1	Daño en la TV y SV	0	0	0.9831	0.9667	0	0	0	0	0
2	Daño en la TV	0	0	0	0.9999	0	0	0	0	0
3	Daño en la TV y Golpe arriba	0	0	0	0.9155	0	0	0	0	0.9879
4	Daño en la TV	0	0	0	0.9897	0	0	0	0.9845	0
5	Daño en la TV y Parafina	0	0	0	0.9866	0.6249	0	0	0	0
6	Daño en TV y Golpe abajo.	0	0	0	0.9966	0	0	0	0.9717	0
7	Daño en TV, SV y Parafina	0	0	0	0.9822	0.4687	0	0	0	0
8	Daño en la TV y parafina	0	0	0	0.9569	0.8923	0	0	0	0
# Iter: 15788						Error: 0.0099984				

Fuente: Autores del Proyecto

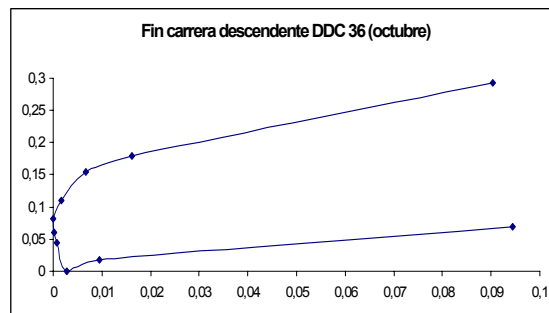
Los resultados y su visualización como se especifica en la metodología se pueden observar en las pantallas sobre las salidas de la red neuronal en el anexo D.

5.5.7 Predicción y Análisis de resultados. La visualización de los resultados de prueba y predicción en el software de redes neuronales se puede consultar en el Anexo D.

El error al identificar la situación de golpe abajo en la etapa de prueba con la red seleccionada de arquitectura 60:10:9 en los dinagramas de prueba #2 y #4, se debe a que los puntos significativos correspondientes a los dinagramas de entrenamiento con golpe abajo presentan una agrupación similar de puntos en el intervalo correspondiente a los valores entre 0 - 0.1, además se puede observar que:

- El dinagrama de prueba #2 presenta un fin de carrera ascendente con una inclinación considerable hacia abajo, como se puede observar en la siguiente figura:

Figura 81. Fin de carrera descendente Dinagrama de prueba 2

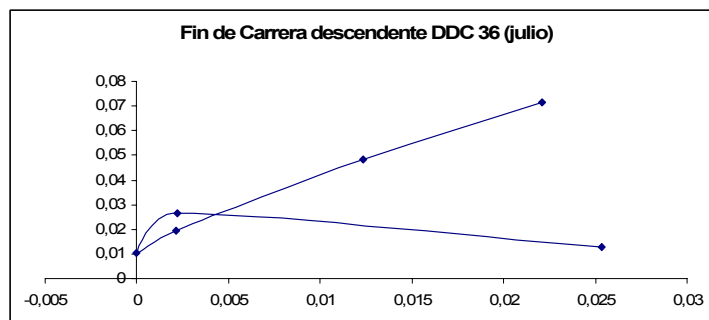


Fuente: Autores del Proyecto.

Sin embargo la red señala este problema como considerable.

- El dinagrama de prueba #4 presenta un fin de carrera ascendente con una inclinación considerable hacia abajo, como se puede observar en la siguiente figura:

Figura 82. Fin de carrera descendente Dinagrama de prueba 4



Fuente: Autores del Proyecto.

En este caso se puede decir que la red efectúa una buena identificación del problema, pero hace una valoración errónea de este.

En ambos casos la solución podría darse involucrando en el entrenamiento más ejemplos de golpe abajo, cuantificando de manera correcta cada ejemplo.

Predicción

Los dinagramas de predicción corresponden como ya se había mencionado a 6 dinagramas y los resultados que arroja la red fueron los siguientes:

Tabla 20. Resultados predicción.

TOPOLOGIA 60:10:9		INTERPRETACION DE LA RED								
Patrón	Interpretación	Normal	Interferencia De gas	SV	TV	Parafina	Golpe de fluido	Varillas partidas	Golpe abajo	Golpe arriba
1	Daño en las válvulas viajera y fija	0	0	0.9660	0.9996	0	0	0	0	0
2	Varillas partidas	0	0	0.2203	0.9670	0	0	0.9919	0	0
3	Varillas partidas	0.1720	0	0	0	0	0	0.7391	0.6864	0
4	Daño en la válvula fija y golpe leve arriba	0	0	0.9913	0	0	0	0	0	0
5	Varillas partidas	0.1916	0	0	0	0	0	0.701	0.726	0
6	Daño en la válvula viajera.	0	0	0.9865	0.9776	0	0	0	0	0
# Iter: 15788						Error:0.0099984				

Fuente: Autores del Proyecto

Dinagrama de Predicción número 1:

El comportamiento de este dinagrama muestra fugas en las válvulas, el reconocimiento de estos problemas es claro y fuertemente valorado por la red, resultados que son satisfactorios y acordes con la interpretación realizada por el Centro de Investigación del Gas y del Petróleo CIGP.

Dinagrama de Predicción número 2:

La red identifica problemas de Válvula Fija con 0.2203, Válvula Viajera con 0.9670 y Varillas Partidas con 0.9919 sin embargo la interpretación hecha por los ingenieros del CIGP indica que la unidad presenta Varillas Partidas, por lo tanto la identificación de los problemas de Válvula Viajera y de Válvula Fija es errónea.

La posible causa de la identificación de estos problemas es debido a que al normalizar el dinagrama se genera una expansión de la grafica similar al comportamiento de daño en las válvulas. (Observar los dinagramas de entrenamiento)

Dinagrama de Predicción número 3:

En este dinagrama la red identifica tres problemas Normal con 0.1720, Varillas Partidas 0.7391 con y Golpe Abajo con 0.6864; de los cuales solo el de Varillas Partidas es el correcto.

Las posibles causas de que la red haya identificado estos problemas se debe a que en el primer intervalo del dinagrama (Parte Inferior) presenta una agrupación de puntos significativos similar al dinagrama de prueba de golpe abajo; por otra parte si bien el reconocimiento de funcionamiento normal es un error a corregir en la red este se puede despreciar por su bajo porcentaje de reconocimiento.

Diagrama de Predicción número 4:

La interpretación efectuada por el CGIP identificó en este dinagrama golpe al final de la carrera ascendente y fuga en la válvula fija, pero el golpe es muy pequeño de acuerdo con los patrones de entrenamiento y la red no lo alcanza a identificarlo, contrario a lo que sucede con el problema de la válvula fija el cual se puede apreciar con mayor facilidad.

Dinagrama de Predicción número 5:

Este dinagrama no posee interpretación realizada por el CIGP, por lo que se realizó una evaluación del comportamiento de este, concluyendo que este corresponde a una unidad con varillas partidas.

En el proceso de interpretación la red reconoció tres problemas Normal con 0.1916, Varillas Partidas con 0.701 y Golpe Abajo con 0.726. El problema de reconocimiento de funcionamiento normal como se había aclarado anteriormente, es un problema de la red, pero su reconocimiento se puede ignorar. El problema de reconocimiento de Golpe Abajo se debe a que la forma del dinagrama muestra una similitud con el problema de Golpe Abajo con la que se había entrenado la red, por esto el resultado arrojado.

Dinagrama de Predicción número 6:

En el análisis realizado por el CIGP se identificó un problema en la válvula viajera, la cual también es identificada por la red, pero la red además reconoce un problema en la válvula fija, que a nuestro criterio, no es un error de la red, debido a que la interpretación de ésta, esta basada en la forma del dinagrama, por lo cual este problema podría estar ocurriendo

La valoración de la red sobre los problemas identificados, a través de la prueba y predicción es aceptable para efectos de este estudio, sin embargo para obtener resultados óptimos es necesario involucrar más dinagramas en su entrenamiento los cuales posean diferentes valoraciones sobre un mismo problema y para cada situación a identificar por la red.

Consecuentemente con el análisis anterior, se puede afirmar que la red neuronal artificial realiza la tarea de reconocimiento de manera aceptable; pero hay que señalar que esta presenta errores de reconocimiento de problemas como normal y golpe abajo, y que son valorados con una probabilidad por debajo de 0.2. Esta situación es un indicio de la falta de dinagramas que complementen la base de

datos de entrenamiento y cubran la mayoría de las posibilidades en cuanto al comportamiento de los problemas tratados.

CONCLUSIONES

- El campo de la Inteligencia Artificial (IA) ha ganado una aceptación considerable en todas las áreas de la ingeniería virtualmente, la ingeniería de producción no podía estar exenta en aprovechar las bondades de la I.A., mediante el desarrollo de redes neuronales artificiales capaces de realizar tareas de reconocimiento y optimización entre otras, que como en este caso son una herramienta de diagnóstico de problemas en la producción de petróleo por medio de bombeo mecánico, pero que ya han probado su utilidad en otros campos como la perforación, la ingeniería de yacimientos, la interpretación de registros de pozos y pruebas de presión.
- Se desarrolló una metodología para procesar los dinagramas de entrada a la red neuronal y se establecieron diversos parámetros para realizar de manera efectiva el entrenamiento la red. La aplicación de la metodología requiere de conocimientos previos tanto de interpretación de dinagramas como de redes neuronales artificiales, si existe falta de conocimientos en alguno de estos dos campos no se podrá realizar de manera exitosa la identificación de problemas en los equipos de subsuelo de las unidades de bombeo mecánico con la red neuronal artificial.
- Para la base de dinagramas de entrenamiento de la red se debe realizar inicialmente una selección de dinagramas básicos sobre problemas o situaciones mas comunes de la bomba en el campo y las condiciones con las cuales opera la unidad de bombeo mecánico. Al involucrar más de un dinagrama sencillo o básico referente al mismo problema se debe evaluar su utilidad o de lo contrario el aprendizaje de este tipo de problema a identificar se hace más complejo para la red, generando una posible saturación de las neuronas.

- Las redes neuronales artificiales presentan un mejor reconocimiento si se involucran en su etapa de aprendizaje dinagramas combinados acorde a los problemas presentados en el campo. Para esto es esencial trabajar con comportamientos claros del problema, es decir dinagramas que no posean ruido en sus registros o que involucren el mínimo, esto con el fin de poder cuantificar las salidas de la red para cada dinagrama de entrenamiento.
- La red únicamente identificará problemas con las formas que le sean enseñadas y como se trabaja sobre estas con puntos significativos que representan cada dinagrama, la red esta atada al procesamiento con los valores numéricos de estos puntos, su diferencia y su cercanía; por lo tanto es de vital importancia prestar atención a los puntos significativos que representan el dinagrama de un problema determinado.
- En la selección de los puntos significativos (PS) sobre cada dinagrama el cambio de dirección donde se involucra el cambio de pendientes es el factor determinante, sin embargo al realizar la aplicación del criterio de selección el cual establece que solo los puntos donde se registren los cambios más grandes en sus pendientes vecinas son significativos, se encontró que los PS pueden agruparse en regiones donde existen cambios bruscos de dirección agotando el numero de puntos por región y dejando relegados sectores importantes para la construcción de la forma del dinagrama. Para solucionar esta situación se analizó la variación cada dos pendientes sin involucrar las pendientes de otras mediciones de variación.
- Se probaron las diferentes opciones de entradas para la red sobre los 60 puntos significativos seleccionados de cada dinagrama, los cuales involucraban 120 entradas (coordenada X, coordenada Y), mostrando mejores resultados para las coordenadas de carga y por lo tanto con 60 entradas. Además se realizó una prueba aislada donde se concluyó que la evaluación de

las pendientes no son parámetros importantes que faciliten la identificación de los problemas.

- De acuerdo con los estudios publicados acerca de esta aplicación, la base de datos de entrenamiento debe ser lo más completa posible y no tiene restricciones en cuanto al número de ejemplos. En el caso de poseer una base de datos de entrenamiento muy pequeña y de no contar con dinagramas reales sin ruido, es necesario para completar la base de datos de entrenamiento con dinagramas elaborados (sintéticos) que cumplan con las exigencias y posibilidades en cuanto al comportamiento de los dinagramas a los cuales se enfrentará la red en la fase de prueba y predicción, además es que involucren ejemplos combinados que permitan la identificación de más de una situación en un dinagrama.
- En este estudio se demuestra que es posible obtener buenos resultados con una base de datos de entrenamiento más pequeña de las usualmente utilizadas.

RECOMENDACIONES

- Es importante al evaluar y seleccionar los dinagramas de entrenamiento y prueba, cuantificar la interpretación con porcentaje de probabilidad que tiene el dinagrama de presentar el problema en cuestión, de esta manera se pueden involucrar dinagramas con un ruido mínimo y se podrá identificar con la red la gravedad del problema correctamente.
- Es recomendable seleccionar los dinagramas de prueba de acuerdo a cada problema a identificar por la red de manera que todos los problemas se involucren en las pruebas; y por lo tanto en la optimización y ajuste de la red.
- Se recomienda que las aplicaciones de este estudio se desarrollen un campo petrolero, del cual se tenga información completa sobre el estado mecánico de los pozos, se tenga registro de los problemas presentados a través del tiempo y principalmente que cuente con una extensa cantidad de registros dinamométricos.
- En este estudio se desarrollo y evaluó la aplicación de las redes neuronales en la identificación de problemas en las bombas utilizados principalmente como referencia los dinagramas incluidos en al versión libre del Echometer. En aplicaciones posteriores o como paso a seguir en el estudio de redes neuronales para el reconocimiento de problemas en las bombas de subsuelo se recomienda analizar las influencias de una base de datos de entrenamiento compuesta completamente por dinagramas pertenecientes al campo, como se sugiere en diferentes estudios publicados.
- En este estudio se creó un software que permite preprocesar los dinagramas y que genera un archivo de entrada para el software de redes neuronales. Como

paso siguiente a este estudio se recomienda crear un software que involucre estas dos etapas, permitiendo que el tiempo de aplicación de la red sea mucho más corto y más sencillo para el usuario.

- Se recomienda realizar un estudio minucioso sobre el número de puntos significativos por región del Dinagrama.

BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA BUITRAGO, María y ZULUAGA MUÑOZ, Camilo. "TUTORIAL SOBRE REDES NEURONALES APLICADAS EN INGENIERIA ELECTRICA". Universidad Tecnológica De Pereira. Facultad De Ingeniería Eléctrica. Tesis (pregrado) 2000.

ALDABAS-RUBIRA, Emiliano. "Introducción al reconocimiento de patrones mediante redes neuronales". UPC-Campus Terrassa-DEE-EUETIT Colom, 1 08222 Terrassa Barcelona. Están referenciados capitulo 4

ALEGRE, Lideniro; DA ROCHA, A.F. y MOROOKA, C.K. "Intelligent Approach of Rod Pumping Problems". Paper 26253. Presentado en Computer Conference, 11-14 Julio, New Orleans, Louisiana 1993.

ALEGRE, Lideniro; MOROOKA, C.K. "Intelligent Diagnosis of Rod Pumping Problems". Paper 26516. Presentado en SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 3-6 Octubre, Houston, Texas.1993.

API RC 11AR. Recommended Practice for Care and Use of Subsurface Pumps. Washington D.C: 2000. p. 1-14.

API RP 11BR. Recommended Practice for Care and Handling of Sucker Rods. Washington D.C: 1989. p. 28.

ASHENAYI, K. Y KEMP, F. "Aplication of an artificial neural network to pump card diagnosis". Paper spe 25420.

BARRETO, M.A; TIGUEL, M.; ROCHA, A.F y MOROOKA, C.K. "Automatic Downhole Card Generation And Classification". Paper SPE 36605. Presentado en

SPE Anual technical Conference and Exhibition held in Denver, Colorado. 9 de Octubre 1995.

BOHORQUEZ, Michel Angelo. toma e interpretación de pruebas dinamométricas, pruebas de nivel y pruebas de ascenso de presión, realizadas con el equipo Well Analyzer en los campos de Tibú, Payoa y Jazmín. UIS. 2005.

CAPACHO, Ruth Páez. Diplomado en Producción. Bombeo Mecánico. UIS.

CIRILLI, Lorenzo Ardití. "An Intelligent for Diagnostic and Control to Mechanical Pumping System". Paper 36079.1996. presentado en SPE Latin America/Caribbean Petroleum Engineering Conference, 23-26 April, Port-of-Spain, Trinidad

CORREDOR MONTAGUT, Martha Vitalia., "Principios de inteligencia artificial & sistemas expertos", Publicaciones UIS. 2000.

ECOPETROL. 2001.

HILERA G., José Ramón. "Redes Neuronales Artificiales: Fundamentos Modelos Y Aplicaciones". Editorial Alfaomega. Publicación Santafe de Bogota 2000.

K. Ashenayi, G.A. Nazi; J.F. Lea and F. Kemp."Aplication of an Artificial Neural Network to Pump Card Diagnosis". Paper SPE 25420. SPE Computer Applications December 1994.

M.Sc. PÁEZ CAPACHO, Ruth. Curso de Sistemas de levantamiento artificial y facilidades de superficie. Agencia Nacional de Hidrocarburos. Organizado por Andean Energy Solutions LTDA y la Asociación Centro de Estudios de Ingeniería de Petr6leos, UIS Bucaramanga Septiembre 24 y Octubre 1 de 2005.

Manual de Bombas de Subsuelo. Trico. 1999.

NAVARRETE, JUAN CARLOS. TORREZ, JUAN EFE. Rediseño del levantamiento artificial por bombeo mecánico mediante el análisis de dinagramas

P. Schirmer, J.C. Gay, and P. Toutain. "Use of Advanced Pattern-Recognition and Knowledge-Based System in Analyzing Dynamometer Cards". Paper , 22305. Presentado en the Sixth SPE Petroleum Computer Conference held in Dallas, Texas, Junio 17-20, 1991.

RED LOCAL ECOPETROL S.A.

REY BOTTO, Blas Octavio. "Optimización de la Operación del Sistema de Bombeo Mecánico de la Sección 67 de los Campos Petroleros "Ing. Gustavo Galindo Velasco". Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Tesis (pregrado) 2004.

RODRIGUEZ, Edwin y GARCÍA Hernando. Análisis de falla y comportamiento en la falla sarta de producción en bombeo mecánico en los campos Castilla y Chichimene. Tesis. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. 2002

ROLSTON, DAVID W. "Principios de Inteligencia Artificial Y Sistemas Expertos". McGraw-Hill, Publicación Bogotá 1990.

RUEDA LIZARAZU, Alexander y GARCÍA JAIMES, Diego. "Estudio Generalizado de Las Aplicaciones de Las Redes Neuronales En La Industria Del Petróleo". Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Tesis (pregrado) 2000.

WEATHERFORD ARTIFICIAL LIFT SYSTEMS. Recomendaciones sobre diseño, selección y manejo de varillas de bombeo.

GENERAL CATALOG LUFKIN: Artificial Lift Nomenclature and application formulas. Texas: 2000. 64 p.

Manual del TWM Software de Echometer Company.

ANEXOS

Anexo A. Bombas Especiales.

Además de las bombas API estándar, existen otros tipos de bombas de varilla. Algunas partes estructurales de dichas bombas especiales, todavía se ajustan a las especificaciones API, haciendo que la reparación de la bomba sea más fácil y menos costosa. Algunas bombas no estándar son las más adecuadas para pozos con problemas operacionales como la interferencia de gas o en aquellos pozos en los cuales existe alta producción de arena o tienen fluidos altamente viscosos. Las altas tasas de producción también requieren el empleo de bombas especiales.

Dentro de los tipos de bombas especiales se pueden destacar:

Bomba de varilla con ancla superior e inferior:

También se conocen como bombas de varilla con barril estacionario con dos anclas instaladas. Se pueden designar como RHAB o RWAB, según la pared del 130 barril utilizado. En general, el ancla de fondo es de tipo mecánico y proporciona la fuerza para el agarre. El ancla superior es del tipo copa y sirve para sellar sobre la parte superior de la bomba. Este tipo de bombas se recomienda si se quiere una bomba grande, ya que las dos anclas aseguran un soporte necesario para el barril.

La parte externa del barril no queda sometida a alta presión gracias al efecto de sello del ancla superior, evitando así el daño del barril. Cuando se bombean crudos arenosos, el ancla superior elimina la posibilidad de que la arena se asiente alrededor del tubo del barril e ingrese a la bomba. Adicionalmente, la superficie exterior del barril queda protegida contra la corrosión que causan los fluidos del pozo. Su principal desventaja es el relativo alto costo por las dos anclas requeridas y la necesidad de preparar una sección especial de tubería, en el sitio donde va a quedar la bomba.

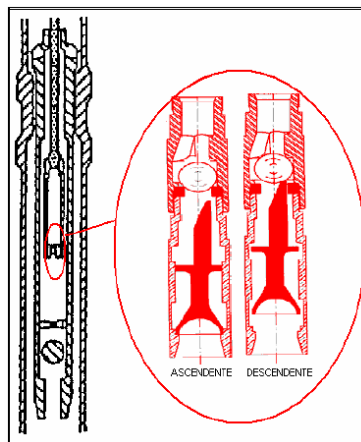
Bomba con válvula de anillo

El empleo de una válvula para arena deslizante sobre la varilla de la válvula de una bomba es una práctica antigua para evitar que la arena se asiente entre el barril y el pistón durante el tiempo de apagado. Un beneficio agregado es que las bombas equipadas con dichas válvulas también aseguran operaciones de bombeo muy eficientes en pozos gasíferos. La válvula para arena usualmente es llamada válvula de anillo, de aquí el nombre de la bomba. Algunas veces también se denomina bomba de dos etapas porque la válvula de anillo facilita la acción de bombeo en dos etapas.6-10

Bomba con válvula Dartt

Al inicio de la carrera ascendente, como muestra la figura A 1.1, la válvula viajera y la válvula Dartt proporcionan un conjunto de tres sellos: un sello circunferencial, un sello de cara en el fondo de la Dartt y un sello de borde (bola-asiento). Esta característica incrementa fuertemente la vida del asiento y la bola y proveerá cierre positivo de la válvula viajera cuando se bombeen crudos pesados (donde las válvulas viajeras estándar tienden a flotar y a no cerrar apropiadamente, 131 reduciendo la eficiencia de la bomba). En el inicio de la carrera descendente, la válvula abre mecánicamente y la bola se sostiene lejos del asiento, eliminando el juego de la bola y el daño prematuro del asiento. Todo el gas presente en la cámara de la bomba, es libre de pasar a través del pistón hasta la tubería de producción. Todo bloqueo de gas es eliminado, ya que la válvula Dartt permite a la bomba bombear eficientemente el gas. Esto elimina también el golpe de fluido, el cual reduce el desgaste de las varillas y de la unidad de bombeo.

Figura A 1.1



Bomba de tres tubos

Todas las bombas de varilla sufren abrasión en el barril y el pistón cuando están cargadas de arena o cuando son bombeados otros fluidos abrasivos. El desgaste por abrasión es menor si se aumenta el ajuste del pistón, pero esto origina una pérdida drástica en el volumen bombeado. Una manera eficiente de reducir el desgaste y mantener una buena operación de bombeo es empleando una bomba de tres tubos, ya que su eficiencia no depende del ajuste del pistón puesto que el sello de las partes móviles queda asegurado por medios hidráulicos.

Un tubo de barril con una válvula fija es rodeado por dos tubos viajeros concéntricos que están agarrados y poseen una válvula viajera en la parte inferior. El tubo externo se puede considerar como un barril viajero. Estos tubos vienen acoplados con una tolerancia de 0.015" entre ellos. Una característica importante es el pequeño diámetro interno cerca de la parte superior del tubo del pistón.

La operación de esta bomba involucra varias etapas. Sobre el recorrido ascendente ambas válvulas viajeras se cierran y la válvula fija se abre. Como el ajuste entre los tres tubos es amplio, entonces los fluidos del pozo se pueden salir, a través de los espacios anulares desde el área de alta presión en la tubería de producción hacia el área de baja presión, por debajo de la válvula viajera de fondo.

Cuando comienza el recorrido descendente, las dos válvulas viajeras se abren y la válvula fija se cierra y los fluidos del pozo se desplazan desde arriba de la válvula fija hasta la válvula viajera de fondo. Una pequeña fracción de este fluido se escapa a través de un pequeño orificio ubicado en la parte superior del tubo del pistón; así como a través de la claridad que hay entre el pistón y el barril estacionario y atraviesa la tolerancia que hay entre los dos barriles hasta ingresar a la tubería. Los fluidos presentes en las áreas anulares de los tubos son recirculados durante los recorridos ascendente y descendente en lugar de desplazarse dentro de la tubería. Este efecto proporciona el sello necesario entre los tubos ajustados ligeramente y facilita el mantenimiento de una acción efectiva de bombeo.

Esta bomba es adecuada para producir fluidos cargados de arena, ya que el empleo de los tubos ajustados genera un desgaste mínimo de las partes que trabajan; por ejemplo, después del fracturamiento hidráulico, los pozos se pueden limpiar con las bombas de tres tubos. En pozos con temperaturas de fondo muy altas, se eliminan los problemas asociados a una expansión térmica desigual de los barriles y los pistones en las bombas convencionales dado que se utilizan los ajustes amplios. La desventaja que presenta esta bomba es que los pozos profundos requieren de tubos más grandes para reducir el deslizamiento de la bomba originado por las altas presiones de la columna de fluido.

Bombas con varillas de válvulas huecas

En los pozos profundos, la varilla de la válvula con barril estacionario tiende a pandearse con el recorrido descendente. El pandeo es muy severo bajo condiciones de golpeteo del fluido, cuando las altas cargas de compresión actúan sobre los dos extremos de la varilla de la válvula y producen desgaste excesivo de la varilla sobre la guía y dentro de la tubería de producción. Para estos casos se recomienda el empleo de un tubo de arrastre estándar. La varilla de válvula hueca es mucho más fuerte que una sólida y reduce casi por completo los problemas de

pandeo. Otro tipo de bomba es la de varillas de dos etapas con válvula hueca y fue desarrollada para bombear pozos con altas presiones de gas/aceite. Además, la bomba también puede poner a producir un pozo por debajo de un empaque, cuando todos los fluido sean sacados con al bomba.

Las características básicas de la bomba son: el empleo de una segunda válvula viajera, un puerto para la varilla de la válvula hueca y una cámara por encima del pistón. En cuanto a la secuencia de operación, al comenzar el recorrido ascendente, la válvula viajera por debajo del pistón se cierra y transporta la carga de fluido. La válvula fija se abre y los fluidos ingresan al barril, por debajo del pistón ascendente. Durante este recorrido el pistón desplaza los fluidos contenidos en la cámara y los empuja a través de los orificios de la varilla de la válvula hueca y los sube hasta la válvula viajera superior. Durante este proceso la mezcla gas/líquido queda comprimida porque el volumen desplazado desde la cámara es considerablemente mayor que el volumen interno de la varilla de la válvula hueca. La elevada presión evita la liberación adicional de gas en la fase líquida y abre la válvula viajera superior. En el punto máximo del recorrido ascendente, el fluido que pasa a través de la válvula viajera superior se detiene y la bola de la válvula regresa a su asiento.

Tan pronto como el pistón comienza a bajar, el espacio de la cámara se incrementa originando una pérdida de presión, la cual contribuye a que la válvula viajera superior se cierre y abra la válvula viajera inferior. La válvula fija se cierra y desplaza los fluidos del barril dentro de la cámara y la varilla de la válvula hueca. Esta bomba proporciona buena operación en aquellos pozos con problemas tanto de gas como de arena. La ruta del fluido dentro de la bomba asegura una remoción continua de las partículas de arena durante el bombeo, pero la arena se puede asentar por encima del ancla de fondo y puede ocasionar el pegue de la bomba.

La acción de bombeo en dos etapas es ideal para producir fluidos gasíferos y puede utilizarse para altas relaciones gas/aceite. La experiencia en el campo indica que esta bomba puede manejar grandes cantidades y no sufrir atascamiento por el mismo.

Anexo B. Analizador de pozo (WELL ANALYZER).

El analizador de pozo es un sistema integrado de adquisición de datos, que permite al ingeniero de producción maximizar la producción de gas o petróleo y minimizar los gastos de operación. Combinando las medidas de presión de superficie, nivel acústico de líquido, dinamómetro, potencia y respuesta de transientes de presión, se pueden determinar, entre otros parámetros, la productividad del pozo, la presión del yacimiento, la eficiencia general, las cargas del equipo y el desempeño del pozo.

Este sistema portátil está basado en un convertidor análogo a digital de precisión, controlado por un computador con aplicaciones basadas en Windows. El Analizador de pozo adquiere, almacena, procesa, despliega y administra los datos en el sitio del pozo para dar un análisis inmediato de las condiciones de operación del pozo. El instrumento es compacto, fuerte y está diseñado para ser usado en condiciones climáticas adversas.

Figura 1. Analizador de pozo



Echometer co. 2007

El analizador de pozo es una unidad electrónica compacta que se controla por medio de un computador portátil que opera con el programa Total Well Management (TWM), esta unidad adquiere y digitaliza las señales recibidas por el micrófono y el transductor de presión instalados en la pistola a gas, al igual que las señales emitidas por la celda de carga y el acelerómetro instalados en la varilla lisa, estas señales son enviadas al computador para su procesamiento. El Analizador de Pozo contiene una batería interna de 12 voltios, esta es una batería de 2.5 Amp-hora.

PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE PRUEBAS DINAMOMÉTRICAS UTILIZANDO EL ANALIZADOR DE POZO.

A continuación se presenta el procedimiento que se lleva a cabo para realizar una prueba dinamométrica con el transductor de carga.

1. Conecte el cable al analizador de pozo y a la celda de carga. NO instale aun el transductor.
2. Inicie el programa TWM en la modalidad adquisición y, en la sección sensor de dinamómetro, seleccione el transductor apropiado (HT) y revise sus coeficientes.
3. Manteniendo el transductor en posición horizontal, calibre y actualice el cero.
4. Seleccione la opción archivo base de pozo y llame los datos del pozo a probar.
5. Seleccione la opción seleccionar prueba y escoja la prueba de dinamómetro.
6. Detenga la unidad de bombeo cerca del final de la carrera descendente y aplique el freno. Coloque la grapa en la barra lisa. Coloque el espaciador de la barra lisa entre la grapa y el prensaestopas. Ponga la unidad a trabajar un poco con el fin de quitarle peso a la unidad y que la barra portavarillas baje 20 cm aproximadamente. Coloque el transductor en la barra lisa, entre la abrazadera permanente de la barra lisa y la barra portavarillas. Libere el freno

para devolverle el peso de varillas a la unidad, hágalo lentamente para no golpear la celda de carga. Retire el espaciador.

7. Seleccione la opción adquirir datos y ponga a trabajar nuevamente la unidad de bombeo, espere a que los datos se estabilicen e inicie la grabación de la prueba.
8. Cuando se finaliza la prueba se muestran los datos en una pantalla para guardarlos o rechazarlos. Si los datos son guardados puede revisarlos, si no, puede regresar a la opción adquirir datos y repetir la prueba.

SECUENCIA QUE SE DEBE SEGUIR EN EL PROGRAMA TWM, PARA LA TOMA DE PRUEBAS DINAMOMÉTRICAS.

Los módulos de programa TWM correspondientes a la prueba dinamométrica se usan para adquirir datos digitales, calcular valores de carga, analizar datos, hacer gráficas y presentar información y análisis de pruebas.

Para realizar la adquisición de datos dinamométricos se tiene en cuenta el siguiente procedimiento:

1. Iniciar el programa TWM en el Modo de Adquisición (Acquire Mode), seleccionar los sensores y realizar la toma del cero.
2. Entrar o llamar el archivo base del pozo al cual se va a realizar el registro dinamométrico.
3. Especificar que tipo de prueba se va a realizar, en este caso Dinamómetro (Dynamometer), esto se hace mediante la función F4- Seleccionar Prueba (F4-Select Test).
4. Comenzar la adquisición de datos por medio de la función F5- Adquisición de Datos (F5-Acquire Data). Inicialmente se muestran al operador los datos para comprobar si el sistema está funcionando apropiadamente, en este momento el operador puede ver la carga y aceleración, aunque estos datos no se están

grabando. Seleccionando Alt-D (Record 1.0 Minutes of Data) se adquieren datos durante un minuto de bombeo. Si se desea grabar por un periodo arbitrario de tiempo, el usuario puede empezar la adquisición con (Alt- S) y terminarla con (Alt-Q). Mientras se están capturando los datos se puede ver una gráfica de Carga Vs tiempo.

5. Después de adquirir los datos, el operador tiene la opción de grabarlos y continuar con el análisis o repetir la adquisición de datos, dependiendo de la calidad de estos.

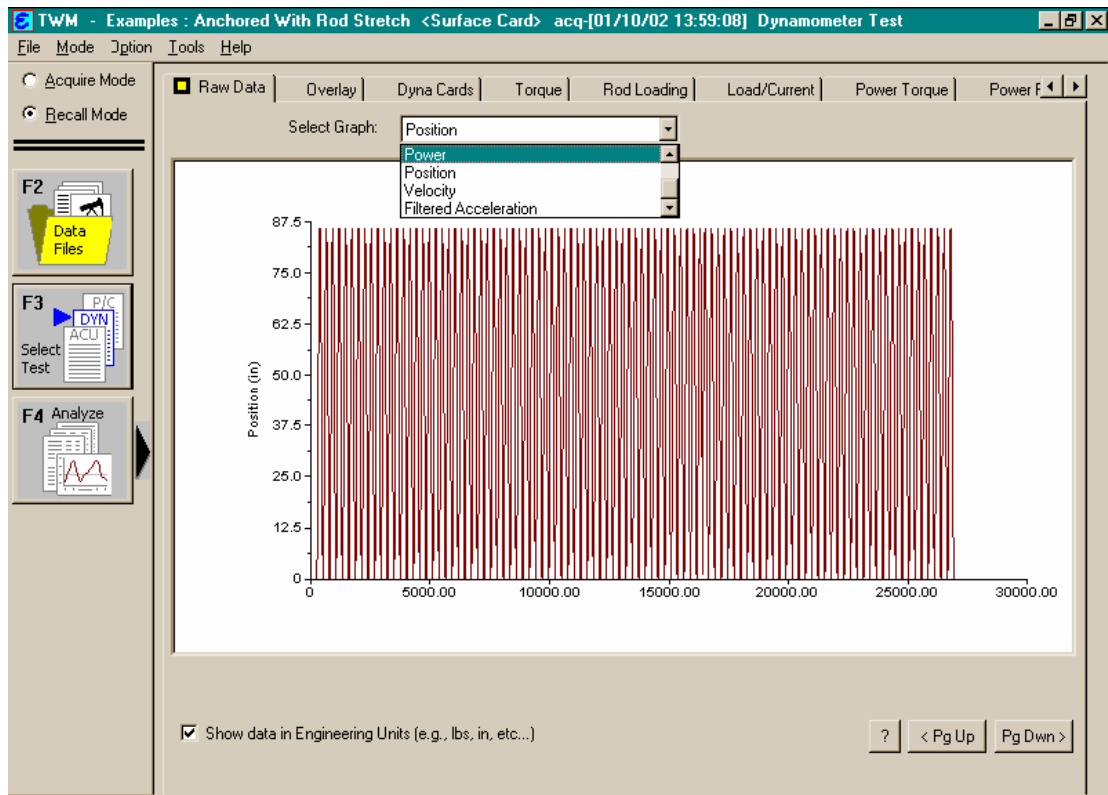
ANÁLISIS DE DATOS DINAMOMÉTRICOS CON EL PROGRAMA TWM.

Después de que los datos han sido grabados, se selecciona la opción F5- Analizar Datos (F5-Analyze Data), que presenta una ventana que permite iniciar la interpretación de la información obtenida por medio de la prueba. En esta ventana se encuentra:

Datos sin Refinar (Raw Date).

En esta ventana se pueden observar gráficas de carga, aceleración, corriente, velocidad y posición en función del tiempo, seleccionando la variable correspondiente desde el menú desplegable, como se ve en la figura XX:

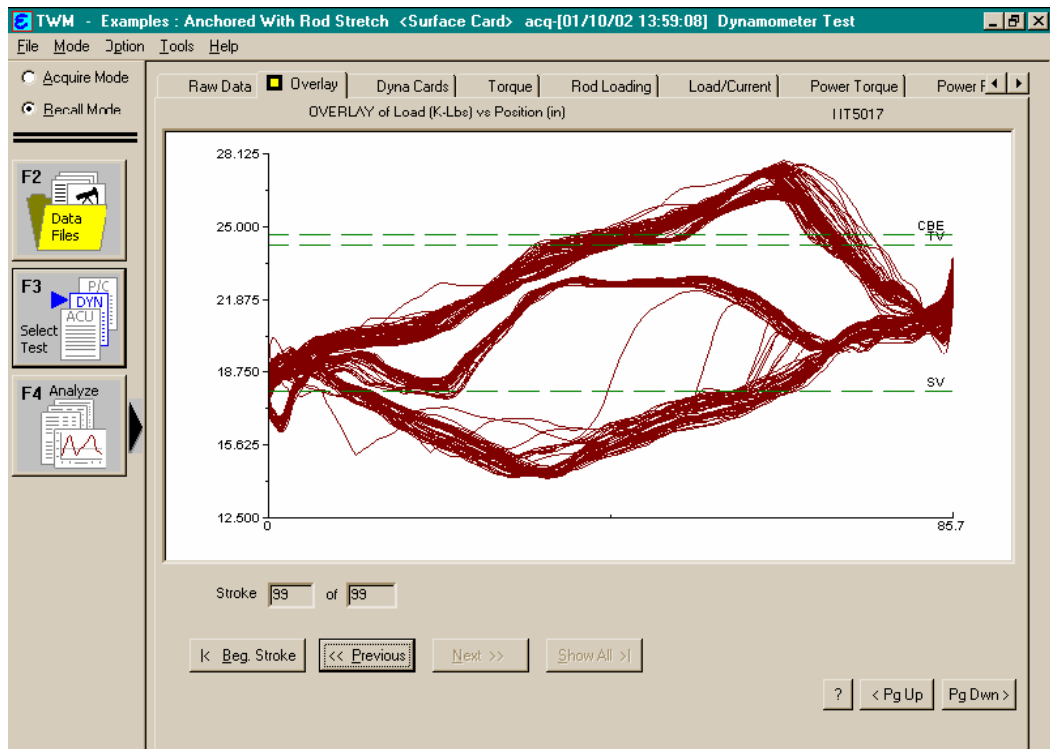
Figura 2. Datos sin Refinar.



Superponer (Overaly).

Seleccionando esta opción se puede ver el dinagrama de superficie de cada carrera grabada. Se mostrará el primer ciclo, segundo ciclo, etc, en secuencia o pueden superponerse uno sobre otro con el fin de verificar la estabilidad de bombeo del pozo. La figura XX muestra la ventana que presenta esta sección, en ella se encuentran superpuestas todas las cartas dinamométricas de superficie grabadas durante una prueba:

Figura 3. Dinagramas de Superficie

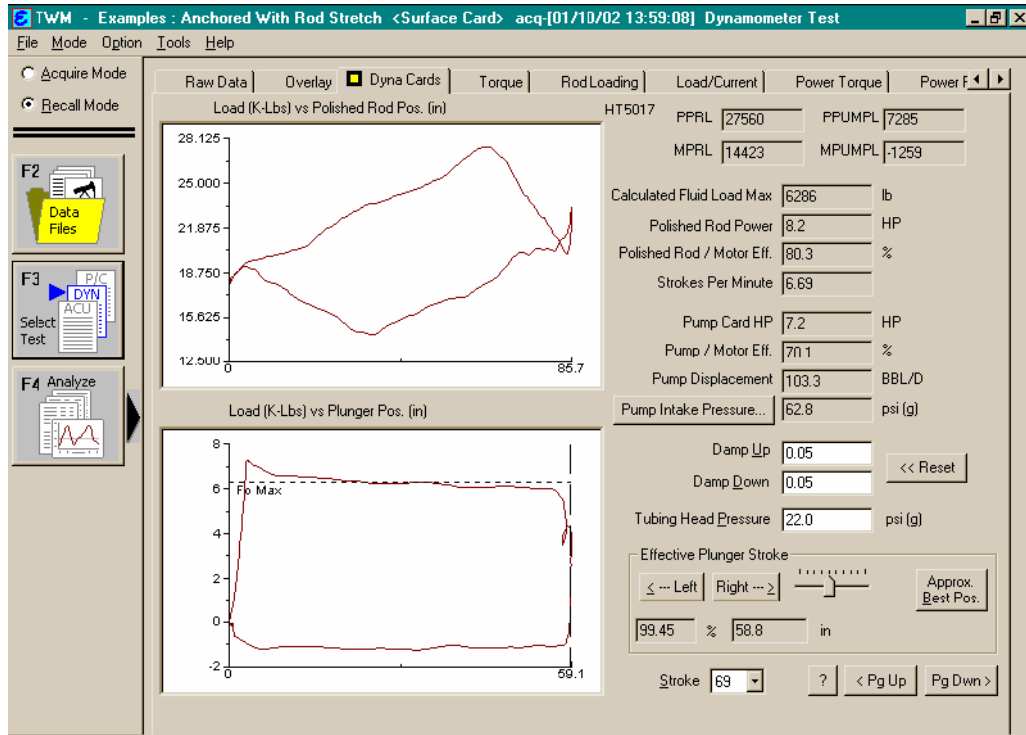


Cartas Dinamométricas (Dyna Cards).

En esta sección el operador puede seleccionar una carrera específica (Stroke) usando el menú desplegable en la parte inferior derecha de la ventana, luego una gráfica del análisis de la carrera se presenta al usuario, como se puede ver en la figura 4:

En la parte superior de la ventana se encuentra el dinagrama de superficie y en la parte inferior el dinagrama de la bomba a condiciones de fondo. En el dinagrama de fondo se muestra un indicador que define la carrera efectiva de la bomba; estando esta definida, el programa calcula el volumen de fluido por día que debería ser desplazado por la bomba bajo las condiciones actuales de bombeo.

Figura 4. Carta Dinamométrica de Fondo



El Dinagrama de fondo que se muestra en esta ventana es el que hemos utilizado para el entrenamiento de nuestra red, tomando de este los datos para tal objetivo.

Análisis de Torque (Torque).

Los objetivos de esta sección son:

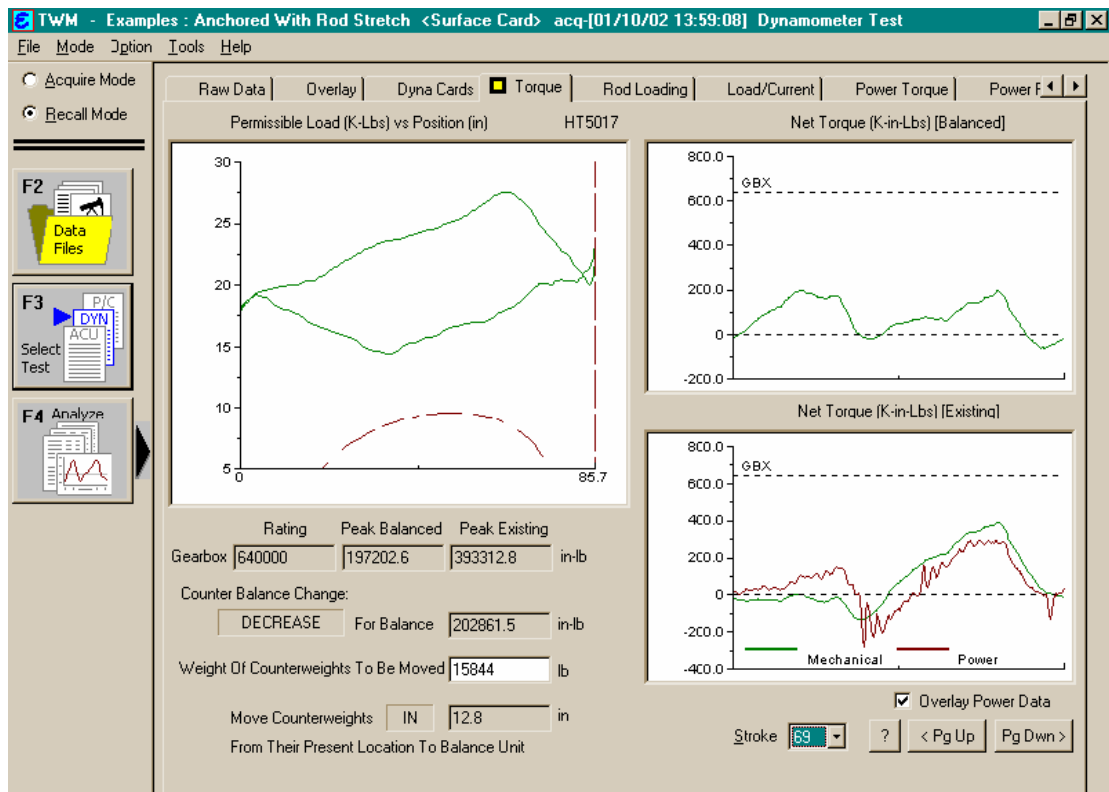
- Determinar la carga del torque de la caja reductora.
- Establecer si la unidad está bien balanceada.
- Determinar el movimiento de las contrapesas, necesario para lograr un mejor balanceo.

Los cálculos requieren conocimiento de la geometría de la unidad de bombeo. Esta información se obtiene en el programa a partir de los valores almacenados en

la biblioteca de unidades de bombeo. Por lo tanto es muy importante que la unidad en uso se identifique correctamente en el archivo del pozo.

La figura 5 muestra la ventana correspondiente al torque:

Figura 5. Análisis de Torque.



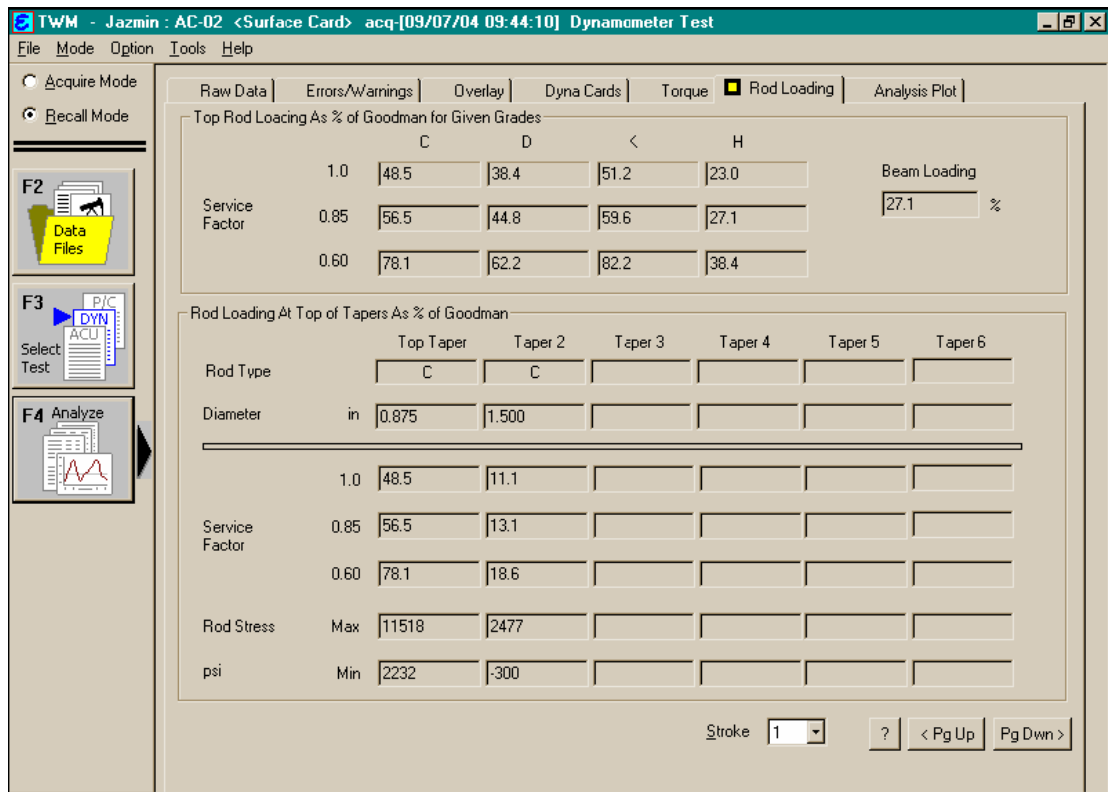
La gráfica de la izquierda muestra el dinagrama a condiciones de superficie que se sobrepone a un diagrama que ilustra los límites de carga permitidos. Las líneas punteadas corresponden a la carga a las condiciones de balanceo existentes. Si el dinagrama cruza estas líneas significa que esta porción de la carrera ha excedido la capacidad del torque nominal de la caja reductora. Las líneas continuas muestran los límites de carga permisibles si la unidad estuviese balanceada adecuadamente.

Información similar se presenta en las gráficas de la derecha, donde el torque es una función del tiempo para una sola carrera, allí se muestra la condición existente (parte inferior) y la ideal (parte superior).

Carga de la Varillas (Rod Loading).

En esta sección se presenta un análisis detallado de la carga que soportan las varillas, como se ve en la figura 6.

Figura 6. Carga de la Varillas.

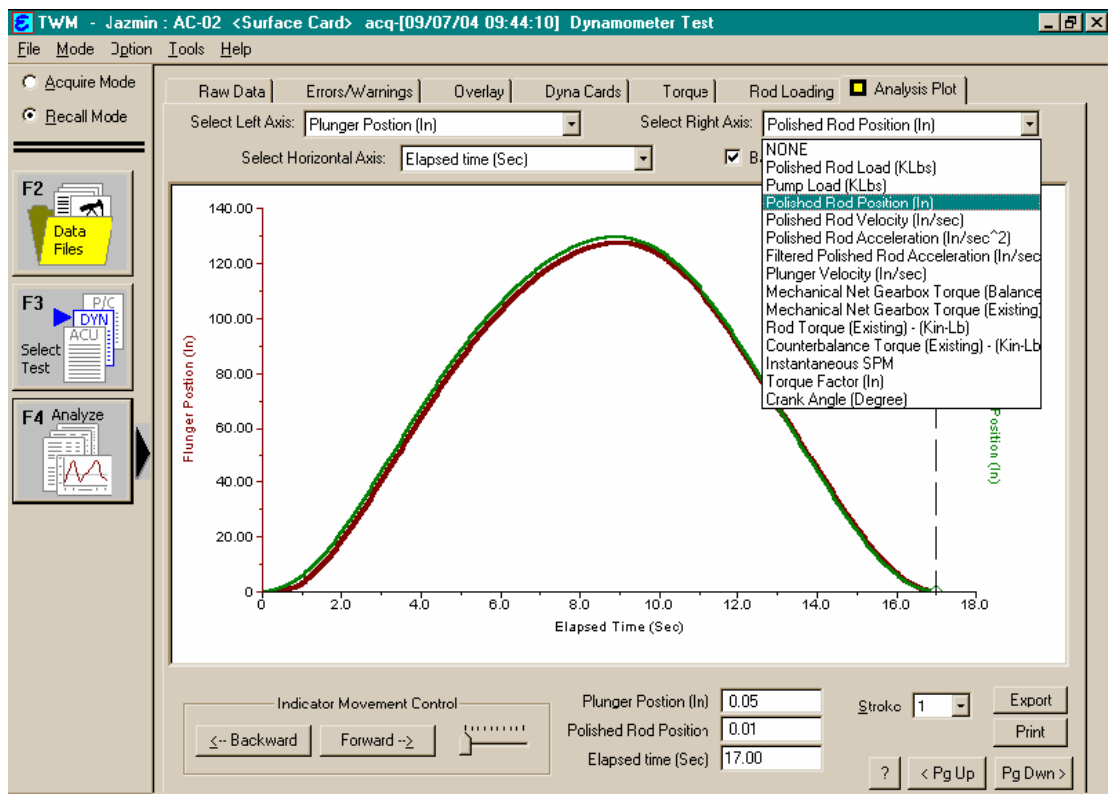


La carga del arreglo superior para diferentes tipos de varillas se muestra en la sección superior de la pantalla, mientras la carga de cada arreglo de varillas existente se muestra en la parte inferior usando varios factores de servicio.

Análisis de gráficas (Analysis Plot).

Esta sección permite graficar, para su análisis, diversas variables como por ejemplo carga sobre la varilla lisa, posición de la varilla lisa, velocidad del pistón, posición del pistón, entre otras, todas en función del tiempo, además permite superponer dos de estas gráficas, las cuales elige el usuario. La figura XX muestra un ejemplo:

Figura 7. Análisis de Gráficas.



En la figura 7 se muestran sobrepuestas las gráfica de posición del pistón (línea verde) y la gráfica de posición de la varilla lisa (línea vinotinto), ambas en función del tiempo. En este caso se observa que el desplazamiento de ambas curvas es muy semejante, lo cual quiere decir que el pistón se está desplazando de manera equivalente a la varilla lisa y sin ninguna obstrucción en su recorrido.

Anexo C. Entrenamiento de la red

En esta sección se encuentra el seguimiento de las etapas de entrenamiento y optimización de la red. De acuerdo a la disponibilidad de software, el desarrollo del proyecto se divide en dos etapas:

1. La primera etapa se realizó con un software llamado “Qwiknet” (versión de prueba), y se estudiaron redes perceptrón multicapa de configuraciones o topología 60:10:9, 120:10:9, de 60 entradas: 9 salidas y 120 entradas: 9 salidas respectivamente.
2. La segunda etapa comprende un trabajo de investigación y búsqueda de la mejor arquitectura y pruebas de sensibilidad del número de neuronas en la capa oculta y número de capas ocultas con el software “MemBrain” (versión libre), teniendo en cuenta que al llegar a esta instancia ya se había establecido que las neuronas de entradas a la red son 60 (ver sección 5.4), en esta etapa se estudiaron diferentes arquitecturas para encontrar la que mejor resultados presente.

Primera etapa:

En primera instancia se evaluaron redes de acuerdo con la forma en la que estaba organizada los diagramas de entrenamiento tipo A y B, y de acuerdo a la forma de introducir los 60 puntos significativos de un diagrama, redes con subíndice 1 y 2. En adelante se realiza una breve descripción de cada red, del entrenamiento y ajuste para obtener un error considerablemente pequeño sobre los patrones de entrenamiento; además al final de la descripción y visualización de los resultados sobre cada tipo de red, se muestran los resultados sobre patrones de prueba y conclusiones al respecto.

Redes tipo A: Para la base de datos de entrenamiento de redes tipo A inicialmente se tomaron los principales problemas de los ejemplos del TMW entre los cuales están:

1. FUNCIONAMIENTO NORMAL SARTA NO ANCLADA
2. INTERFERENCIA DE GAS
3. FUGA EN LA VALVULA FIJA
4. DAÑO EN LA VALVULA VIAJERA SIN ANCLA
5. BASURA QUE ATASCA LA AVERTURA DE LA VALVULA FIJA
6. GOLPE DE FLUIDO
7. VARILLAS PARTIDAS
8. ACCION ERRATICA DE LA VALVULA VIAJERA

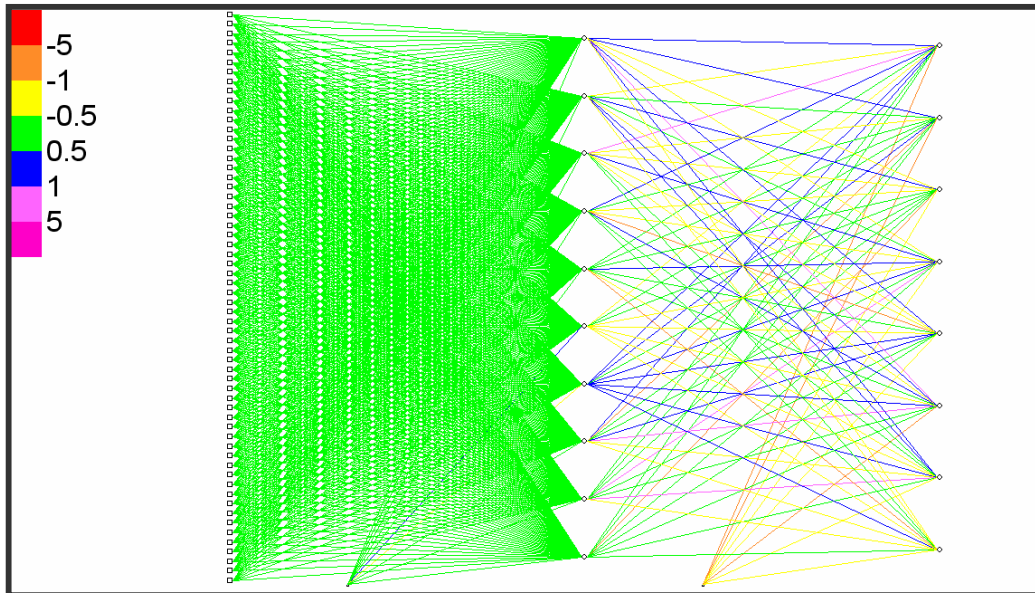
De acuerdo a los problemas considerados para estas redes el número de neuronas de salida es ocho (8) como es descrito en el capítulo 4, cada neurona de salida corresponde a un problema a ser reconocido por la red.

Redes A₁ y A₂: De acuerdo a la forma de introducir los datos en la red se realizaron dos redes y se trabajaron al mismo tiempo para realizar comparaciones para determinar la sensibilidad y grado de importancia de los datos de entrada, esto se realizó de la siguiente manera:

La red A₁ posee 60 neuronas de entrada que corresponden cada una a la coordenadas Y de los 60 puntos significativos de un dinagrama de fondo, de la siguiente manera: Y1 a N1, Y2 a N2,....., Y60 a N60; donde N corresponde a la neurona de entrada. *Es importante señalar que se realizaron pruebas con los datos de las coordenadas X de posición el pistón, y que estas no mostraron ventajas sobre las redes cuyas entradas son únicamente los datos de carga en el reconocimiento de los problemas entrenados.* Por lo tanto y en base a lo expuesto

la red A₁ tiene arquitectura 60:10:8 (60 nodos de entrada, 10 neuronas en la capa oculta y 8 nodos de salida).

Figura 1. Visualización de red 60:10:8



F. TANGSIG CAPA OCULTA F. SIGMOIDAL CAPA SALIDA

En el entrenamiento de la red primero se tomó una tasa de aprendizaje de 0.1, con un error marginal de 0.1 (error por debajo del cual se considera un patrón aprendido), coeficiente de momentum de 0, además de criterios de parada como:

Epochs	100000
Avg RMS Error	0.01
Max RMS Error	0.01
Max Error	0.01
Percent correct	100

Donde:

RMS: Es la raíz cuadrada más pequeña

Avg RMS Error: Es el promedio de la raíz cuadrada del error de datos del entrenamiento.

Max RMS Error: Se determina encontrando el patrón de entrenamiento que produce el error RMS más grande sobre todas las salidas de la red.

Max Error: Máximo del error absoluto, se determina encontrando la salida con la magnitud de error absoluto más grande sobre todos los patrones de entrenamiento y sobre todas las salidas.

Percent correct: Es el porcentaje de patrones de entrenamiento considerado aprendido por la red.

Y los resultados fueron:

Epochs	201
Avg RMS Error	0.0795649
Max RMS Error	0.099744
Max Error	0.211999
Number correct	8
Percent correct	100

Como puede observarse el entrenamiento se detuvo debido al porcentaje correcto de patrones aprendidos. Estos resultados se pueden visualizar de la siguiente con las siguientes graficas:

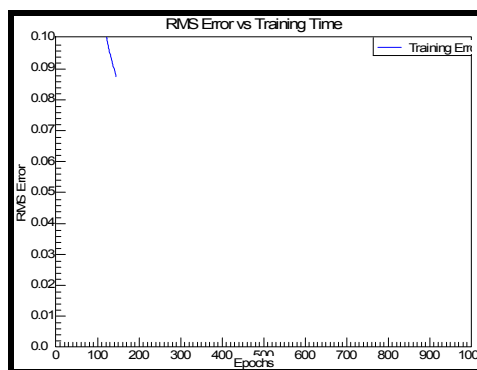
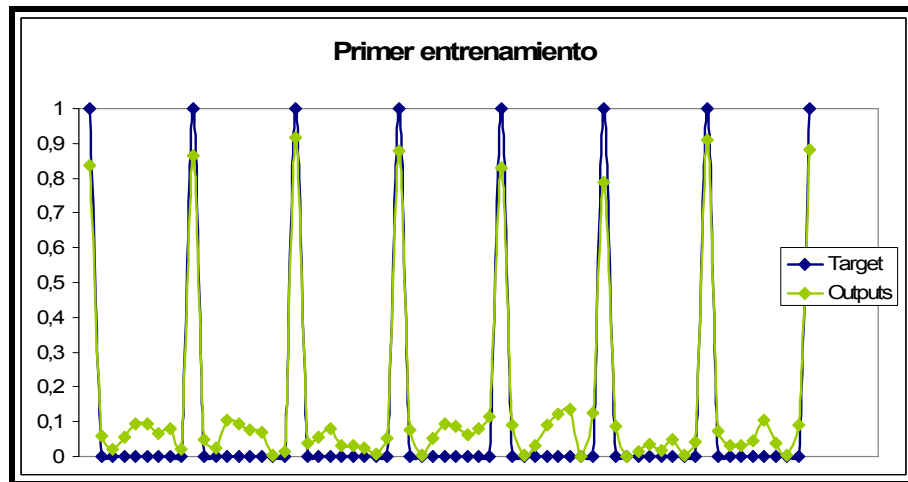


Figura XXX. Error primera fase de entrenamiento red 60:10:8

Además el software “Qwiknet” presenta la facilidad de mostrar la graficas de salidas, entradas vs patrones por cada nodo de salida, pero para efectos de visualización rápida de resultados concretos fabricamos la siguiente grafica:

Figura 2. Visualización de resultados parciales red 60:10:8.



Cada punto azul corresponde al valor esperado y cada punto verde trazando una línea vertical sobre cada punto azul es la salida calculada por la red. Por lo tanto esta grafica indica que es necesario realizar reentrenamiento si se desea obtener resultados mejores. En base a lo anterior los criterios iniciales fueron modificados disminuyendo el error marginal a 0,01 para que el entrenamiento no se detuviera tan rápido y exigirle a la red menor error al considerar un patrón aprendido, y los resultados fueron los siguientes.

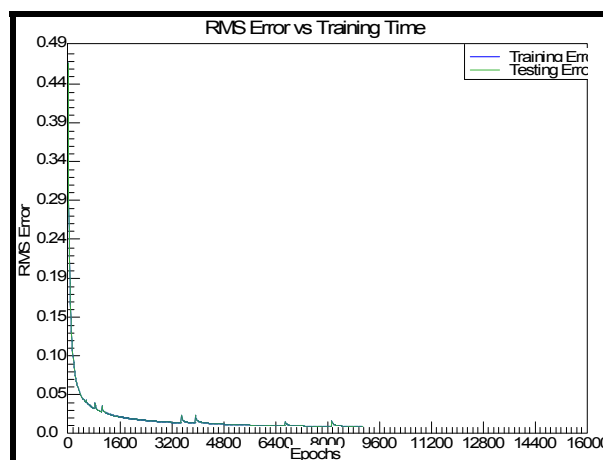
Epochs	6854
Avg RMS Error	0.009999
Max RMS Error	0.012084
Max Error	0.022779
Number correct	6
Percent correct	75

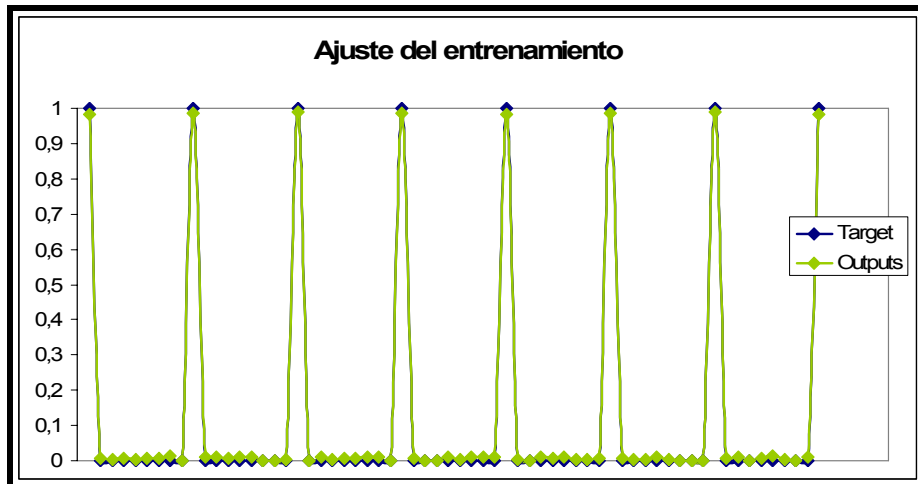
Debido a que el entrenamiento se detuvo por alcanzar un valor de Avg RMS Error menor a 0.01, teniendo tan solo el 75% de los patrones aprendidos, se redujo el Avg RMS Error a 0.001 y se obtuvo

Epochs	9096
Avg RMS Error	0.008445
Max RMS Error	0.009988
Max Error	0.0165304
Number correct	8
Percent correct	100

Este proceso de entrenamiento arrojó los siguientes resultados satisfactorios:

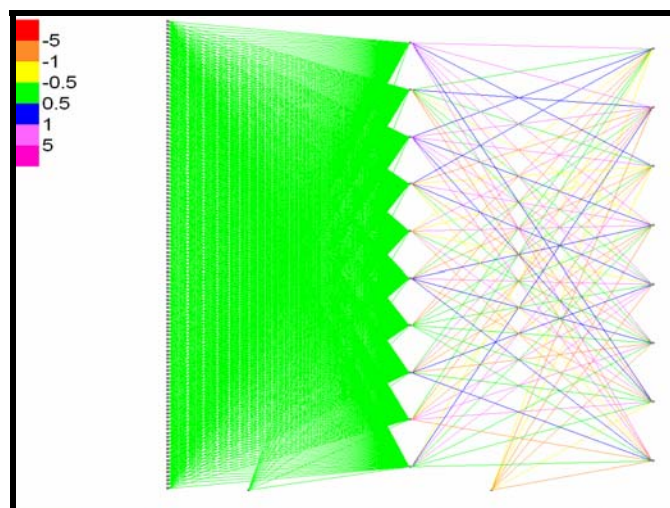
Figura 3. Visualización de resultados finales y Error.





La red **A₂** posee 120 neuronas de entrada que corresponden a las parejas X,Y (posición del pistón, carga soportada) de los 60 puntos significativos de un dinagrama de fondo, donde cada nodo de entrada corresponden a cada una de las coordenadas de la siguiente manera: X1 a N1, Y1 a N2, X2 a N3, Y2 a N4X60 a N119 y Y60 a N120; donde N corresponde a la neurona de entrada. En base a lo expuesto la red **A₂** tiene arquitectura 120:10:8 (120 nodos de entrada, 10 neuronas en la capa oculta y 8 nodos de salida)

Figura 5. Visualización de la red 120:10:8



F. TANGSIG CAPA OCULTA

F. SIGMOIDAL CAPA SALIDA

De manera consecuente con el procedimiento realizado y los resultados obtenidos con la red A₁, los parámetros de entrenamiento iniciales y los criterios fueron los mismos para la red A₂, pero además se disminuyó el error marginal a 0,01 y Los resultados fueron los siguientes:

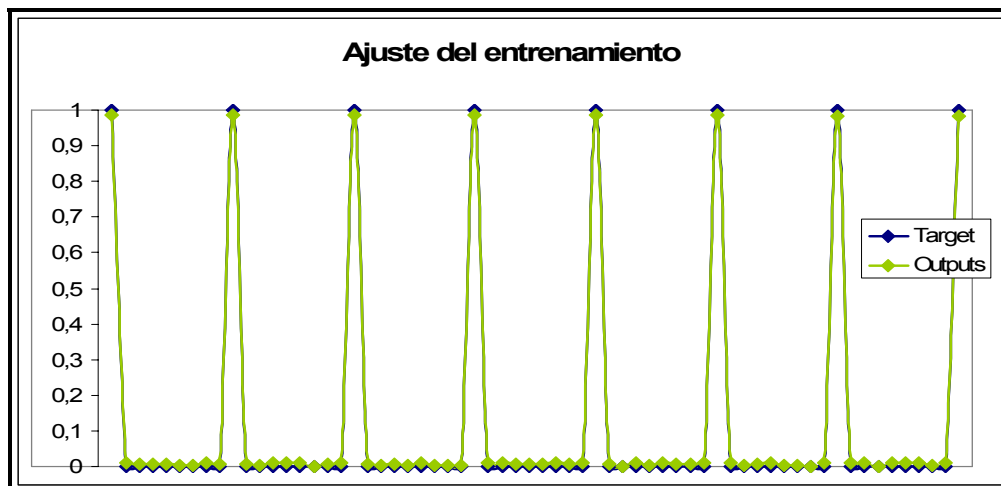
Epochs	5906
Avg RMS Error	0.00999993
Max RMS Error	0.0109253
Max Error	0.0190253
Number correct	4
Percent correct	50

Como el entrenamiento se detuvo debido a que el promedio de la raíz cuadrada del error de datos del entrenamiento (Avg RMS Error) está por debajo de 0.01 teniendo solamente el 50% de los patrones de entrenamiento fueron aprendidos, para obtener mejores resultados el valor del Avg RMS Error se redujo a 0.001.

Epochs	7632
Avg RMS Error	0.00872676
Max RMS Error	0.00999954
Max Error	0.0171544
Number correct	8
Percent correct	100

Los resultados sobre los patrones de entrenamiento se pueden observar en la siguiente gráfica.

Figura 6. Visualización de resultados parciales red 120:10:8.



Como puede observarse hasta aquí los resultados de ambas redes sobre los patrones de entrenamiento son muy similares y muy buenos, por lo tanto es necesario realizar una prueba sobre otros patrones que proporcione elementos para valorar cada red. Estos nuevos patrones corresponden a dinagramas elaborados cuidadosamente con las formas ideales de los llamados "dinagramas sintéticos" y que poseen o involucran dos formas que representan problemas diferentes en diferentes regiones del dinagrama(ver sección 5.1). Los dinagrama prueba son únicamente 2, ya que con esto queremos evaluar principalmente el numero de entradas de la red. Estos dinagramas involucran cada uno dos problemas los cuales son respectivamente:

3. Golpe de fluido y escurrimiento por válvula viajera
4. Compresión de gas y daño en la válvula viajera

En las siguientes tablas se pueden observar las reapuestas de las redes a cada uno de los dinagramas prueba.

Red A₁

	normal	int gas	Fuga en valvula fija	Daño en valvula viajera sin ancla	Basura atascada en la valvula fija	Golpe de fluido	varillas partidas	Accion erratica de la valvula viajera
Golpe de fluido y escurrimiento por TV	0,536897	0,070983	0,000096	0,00001	0,000263	0,558082	0,035661	0,00289
Compresion de gas y escurrimiento	0,003458	0,986339	0,001753	0,003251	0,000223	0,009159	0,007569	0

Red A₂

	normal	int gas	Fuga en valvula fija	Daño en valvula viajera sin ancla	Basura atascada en la valvula fija	Golpe de fluido	varillas partidas	Accion erratica de la valvula viajera
Golpe de fluido y escurrimiento	0,000506	0,01694	0,001059	0,011504	0,002023	0,814298	0,000696	0,001892
Compresion de gas y escurrimiento	0,005638	0,958201	0,00574	0,011711	0,001795	0,01252	0,014383	0,000035

Como puede observarse en ambos casos el reconocimiento de dos circunstancias problema en la bomba no es posible, sin embargo, en ambos casos se reconoce uno de los dos problemas, cada red presenta mejores resultados que la otra en uno de los dos dinagramas prueba. Esto es a red A₂ reconoce mejor el problema de golpe de fluido que la red A₁, y la red A₁ reconoce mejor el problema de compresión de gas que la red A₂.

Luego de analizar estos resultados y buscando establecer los datos de entrada a la red más relevantes para la tarea de reconocimiento, los dinagramas de la base entrenamiento fueron reorganizados creando las redes tipo B.

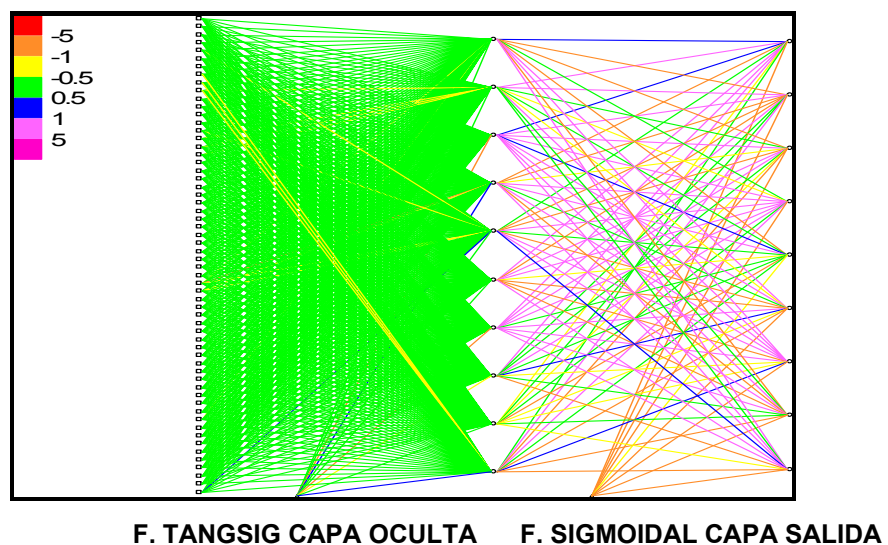
Red B: Esta red comprende problemas reorganizados de tal forma que los ejemplos concernientes a daños u obstrucción por ejemplo en la válvula fija constituyan un solo tipo de problema, de la siguiente manera:

1. FUNCIONAMIENTO NORMAL SARTA NO ANCLADA
2. INTERFERENCIA DE GAS
3. -FUGA EN LA VALVULA FIJA
-BASURA QUE ATASCA LA AVERTURA DE LA VALVULA FIJA
4. -DAÑO EN LA VALVULA VIAJERA SIN ANCLA
-ACCION ERRATICA DE LA VALVULA VIAJERA
10. GOLPE DE FLUIDO
11. VARILLAS PARTIDAS
12. FUGA EN EL BARRIL
13. GOLPE ABAJO
14. ASFALTENOS EN LA BOMBA

De acuerdo a los problemas considerados para estas redes el número de neuronas de salida es nueve (9) como es descrito en el capítulo 4, cada neurona de salida corresponde a un problema a ser reconocido por la red.

La red **B1** corresponde a configuración 60:10:9, donde las 60 entradas corresponden a las coordenadas de carga al igual que la red A1.

Figura 7. Visualización de red 60:10:9



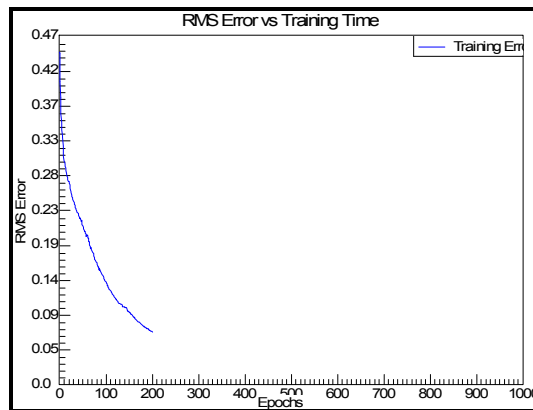
En el entrenamiento de la red primero se tomo una rata de aprendizaje de 0.1, con un error marginal de 0.1, además de criterios de parada de

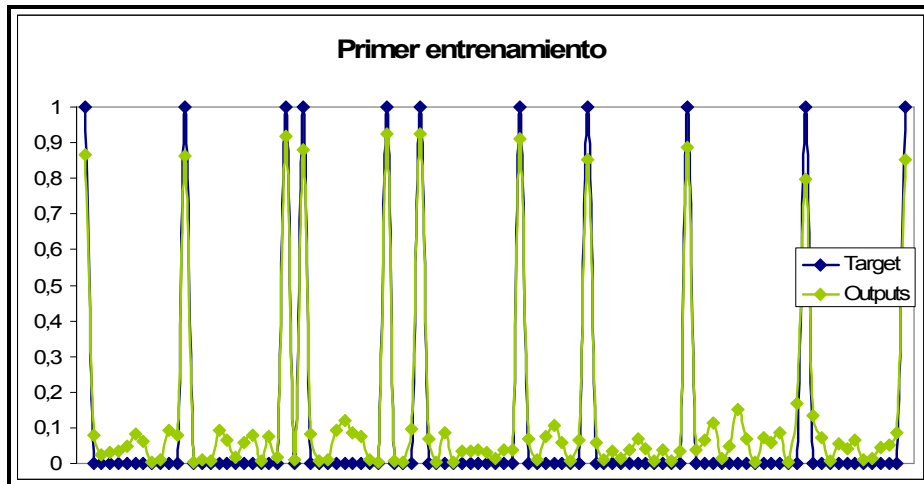
Epochs	100000
Avg RMS Error	0.01
Max RMS Error	0.01
Max Error	0.01
Percent correct	100

Y los resultados fueron:

Epochs	202
Avg RMS Error	0.0711988
Max RMS Error	0.099864
Max Error	0.203291
Number correct	11
Percent correct	100

Figura 8. Visualización de resultados parciales error de la red 60:10:9.





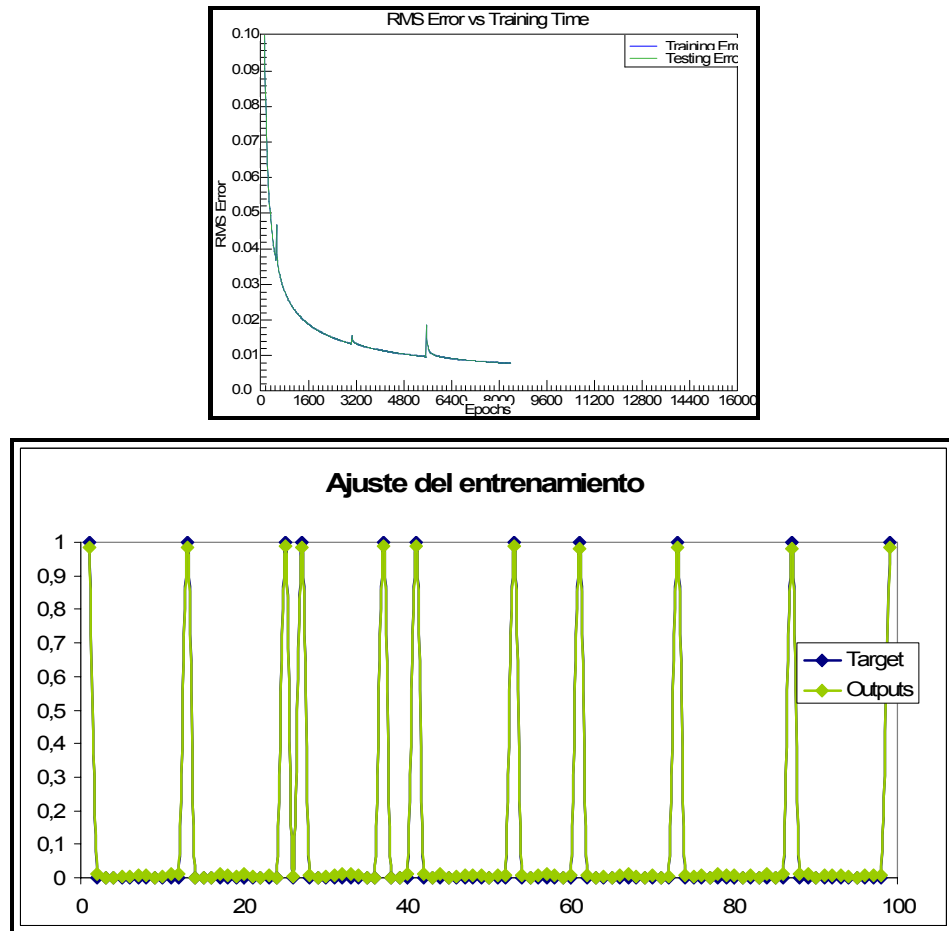
Por lo tanto para mejorar los resultados, a los criterios iniciales le disminuimos el error marginal a 0,01 para que el entrenamiento no se detuviera tan rápido al considerar el 100% de los patrones aprendidos y exigirle a la red menor error al considerar un patrón aprendido, y los resultados fueron los siguientes:

Epochs	4472
Avg RMS Error	0.009999
Max RMS Error	0.012507
Max Error	0.0229652
Number correct	4
Percent correct	36

Según esto el entrenamiento se detuvo porque el Avg RMS Error alcanzo un valor por debajo de 0.01, entonces es necesario reducir el promedio de la raíz cuadrada del error de datos del entrenamiento (Avg RMS Error) a 0.001 y obtenemos:

Epochs	6872
Avg RMS Error	0.007985
Max RMS Error	0.009998
Max Error	0.018077
Number correct	11
Percent correct	100

Figura 9. Visualización de resultados Finales y error de la red 60:10:9.

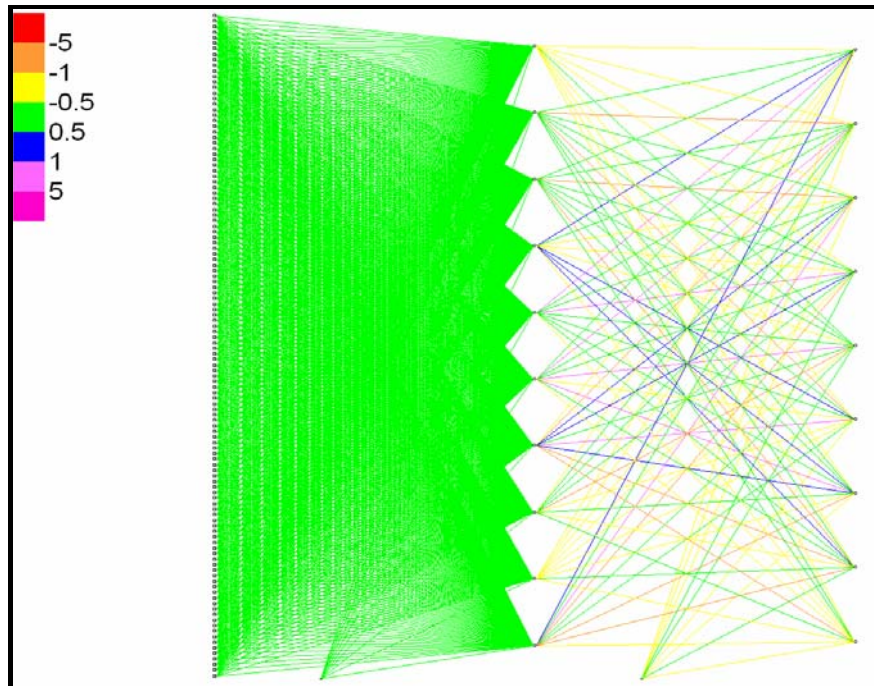


Las graficas anteriores demuestran los buenos resultados que alcanza la red **B₁** sobre los patrones de entrenamiento.

La **red B₂** posee 120 neuronas de entrada que corresponden a las parejas X,Y (posición del pistón, carga soportada) de los 60 puntos significativos de un dinagrama de fondo, donde cada nodo de entrada corresponden a cada una de las coordenadas de la siguiente manera: X1 a N1, Y1 a N2, X2 a N3, Y2 a N4X60 a N119 y Y60 a N120; donde N corresponde a la neurona de entrada.

En base a lo expuesto la red B2 tiene arquitectura 120:10:9 (120 nodos de entrada, 10 neuronas en la capa oculta y 9 nodos de salida)

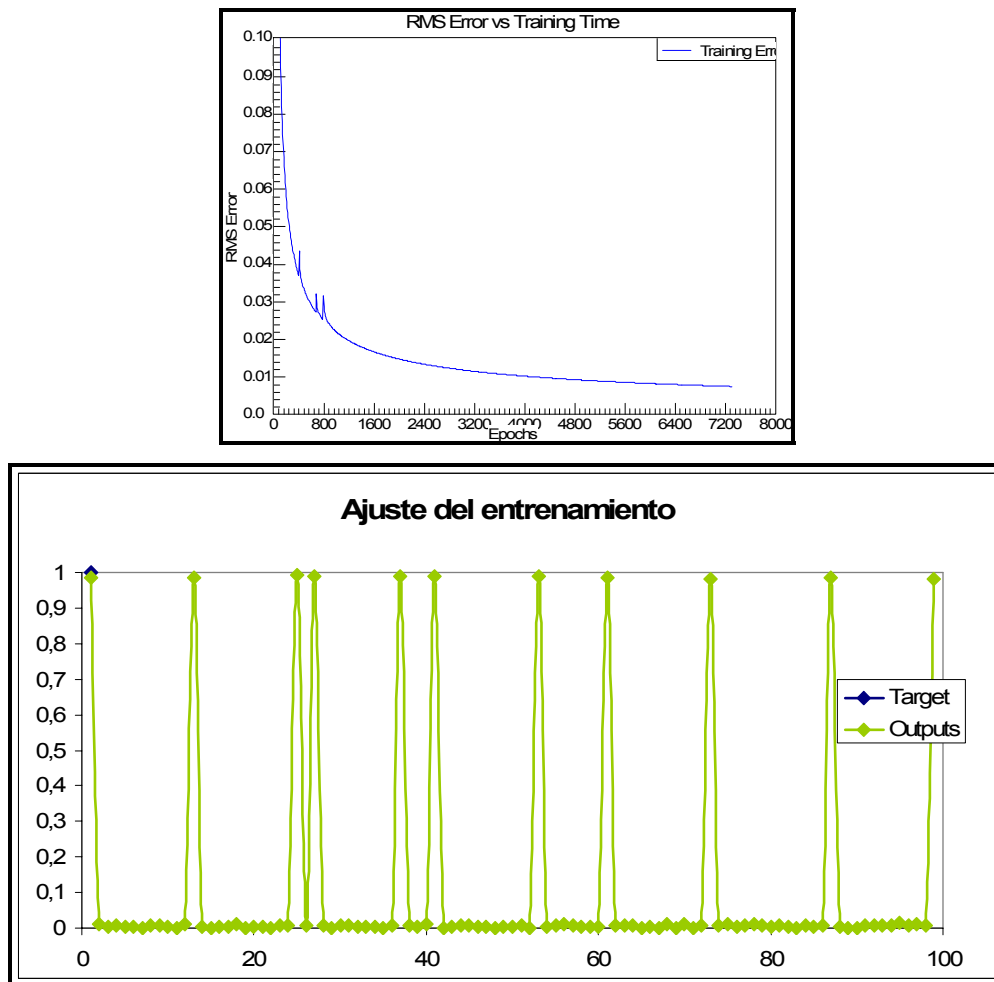
Figura 10. Visualización Red 120:10:9



De acuerdo con el procedimiento realizado y los resultados obtenidos con las diferentes redes, los parámetros de entrenamiento iniciales y los criterios fueron los mismos que los utilizados en la red B1, pero además a los criterios iniciales se cambio el error marginal a 0,01 para que el entrenamiento no se detuviera tan rápido y exigirle a la red menor error al considerar un patrón aprendido y también se redujo el Avg RMS Error a 0.001 conduciendo a los siguientes resultados:

Epochs	7326
Avg RMS Error	0.007501
Max RMS Error	0.009999
Max Error	0.0198517
Number correct	11
Percent correct	100

Figura 11. Visualización de resultados finales y error de la red 120:10:9.



Como puede observarse hasta aquí los resultados de ambas redes sobre los patrones de entrenamiento son muy similares y muy buenos, por lo tanto es necesario realizar una prueba como la realizada sobre las redes tipo A, con otros patrones que proporcionen elementos para valorar cada red. Estos nuevos patrones corresponden a dinagramas elaborados cuidadosamente con las formas ideales como en la prueba con las otras redes e involucran dos formas que representan problemas diferentes en diferentes regiones del dinagrama (ver

sección 5.1). Los dinagrama prueba son 3. Estos dinagramas involucran cada uno dos problemas los cuales son respectivamente:

4. Golpe de fluido y escurrimiento por válvula viajera.
5. Compresión de gas y daño en la válvula viajera.
6. Golpe abajo con acción errática de la válvula viajera.

En las siguientes tablas se pueden observar las reauptas de las redes a cada uno de los dinagramas prueba.

Red B1.

	normal	int gas	sv	tv	fuga	Golpe de fluido	varillas partidas	gope abajo	asfaltenos
Golpe de fluido y escurrimiento	0,248108	0,032646	0,002063	0,005159	0,000441	0,91329	0,01483	0,000008	0,001187
Compresion de gas y escurrimiento tv erratica	0,093825	0,990755	0,00885	0,000933	0,005531	0,006003	0,066369	0,003342	0,000002
Golpe abajo con accion erratica de la tv	0,13798	0,016541	0,001008	0,000942	0,001276	0,000013	0,010579	0,862079	0,00045

Red B2

	normal	int gas	sv	tv	fuga	Golpe de fluido	varillas partidas	gope abajo	asfaltenos
Golpe de fluido y escurrimiento	0,002085	0,006857	0,000087	0,02258	0,000211	0,605136	0,019167	0,00158	0,000749
Compresion de gas y escurrimiento tv erratica	0,008756	0,965462	0,004829	0,004402	0,00051	0,007329	0,019265	0,00331	0,000005
Golpe abajo con accion erratica de la tv	0,01022	0,001196	0,000422	0,017077	0,006311	0,001347	0,01311	0,951809	0,017257

Los resultados anteriores muestran que las redes no pueden realizar el reconocimiento de más de un patrón, que red A1 es mucho más efectiva en el reconocimiento del golpe de fluido y de interferencia de gas, y además muestra que las diferencias en el reconocimiento de patrones entre las redes con 60 y 120 neuronas de entradas no son significativas. Con esto se concluye las serie de

pruebas de sensibilidad de las entradas a la red neuronal, y se selecciona la arquitectura de la red de B1 ya que presenta mejores resultados y es más sencilla que la red B2, lo que cumple con la regla general de un proyecto neurocomputacional que advierte que es esencial trabajar con la arquitectura mas sencilla y simple para obtener resultados óptimos y evitar hacer más complejo el problema.

Segunda Etapa:

La segunda etapa comprende un trabajo de investigación y búsqueda de la mejor arquitectura y pruebas de sensibilidad del número de neuronas en la capa oculta y número de capas ocultas con el software “MemBrain” (versión libre), en esta etapa se estudiaron diferentes arquitecturas para encontrar la más adecuada. En esta etapa los dinagramas prueba corresponden a dinagramas del campo escuela colorado, descritos como dinagramas de prueba segunda etapa en la sección 5.1. En La siguiente tabla muestra algunas de redes más estudiadas en esta etapa.

Tabla 1. Arquitecturas evaluadas.

1 capa oculta	2 capas ocultas	3 capas ocultas
60:10:9	60:12:10:9	60:30:16:10:9
60:20:10	60:20:10:9	60:35:15:10:9
60:30:11	60:20:15:9	60:30:20:10:9
60:40:12	60:16:10:9	60:40:20:10:9

Estas pruebas de sensibilidad arrojaron las siguientes conclusiones y resultados:

- Respecto a las redes con 3 capas ocultas: Los resultados muestran que las redes identifican cualquier dinagrama de prueba como un dinagrama de una unidad que posee varillas partidas y algunas veces activándose más de una neurona de salida, pero no la correspondiente a los problemas

implícitos en el dinagrama de prueba. Las redes en consecuencia con sus resultados muestran ser muy complejas para este tipo de tarea, pues muestran buenos resultados sobre los patrones de entrenamiento y malos sobre las pruebas.

- Respecto a las redes con 2 capas ocultas: Los resultados muestran que las redes identifican uno de los problemas involucrados en los dinagramas de prueba, pero en un porcentaje muy bajo con respecto a el reconocimiento que se ha alcanzado hasta el momento con redes de una sola capa oculta, además algunas redes identifican dinagramas de prueba como un dinagramas de una unidad que posee varillas partidas. Esto nos dirige a la conclusión que entre más sencilla la arquitectura de la red, se obtienen mejores resultados.
- Respecto a las redes con 1 capa oculta: Los resultados muestran que las redes identifican uno de los problemas involucrados en los dinagramas de prueba, sin embargo los resultados mejoran un poco al aumentar el número de neuronas en la capa oculta, estableciendo como numero limite de neuronas por encima del cual los resultados empeoran 20 neuronas en la capa oculta.
- Aquí concluimos que solamente es necesario mantener una arquitectura sencilla de una capa oculta y que es necesario realizar modificaciones diferentes a las de arquitectura si quiere llagar a reconocer más de un problema en un dinagrama.

Es importante señalar que estos resultados corresponden son validos exclusivamente para este tipo de problema y específicamente para la base de entrenamiento utilizada con las respectivas entradas y salidas a la red, por lo tanto si alguno de estos elementos fuera alterado posteriormente, es necesario investigar de nuevo la mejor arquitectura.

La modificación realizada para obtener mejores resultados trata de una reorganización de la base de datos de entrenamiento y adición de nuevos dinagramas de entrenamiento, estos nuevos dinagramas de entrenamiento corresponden a los dinagramas prueba sintéticos utilizados en la primera etapa, admitiéndolos como de entrenamiento ya que son dinagramas combinados elaborados a partir de los dinagramas sintéticos hasta el momento utilizados como de entrenamiento. La organización de la base de datos de entrenamiento es una reclasificación y revisión de los dinagramas, la cual no incluyo el dinagrama sobre depositacion de parafinas e incluyo la identificación de un problema de diseño que esta involucrado en los dinagramas del campo colorado de prueba, este problema de diseño es conocido como golpe arriba. Por lo tanto la configuración usada para realizar este ejercicio es 60:10:9.

Figura 13. Visualización de la red 60:10:9 MemBrain

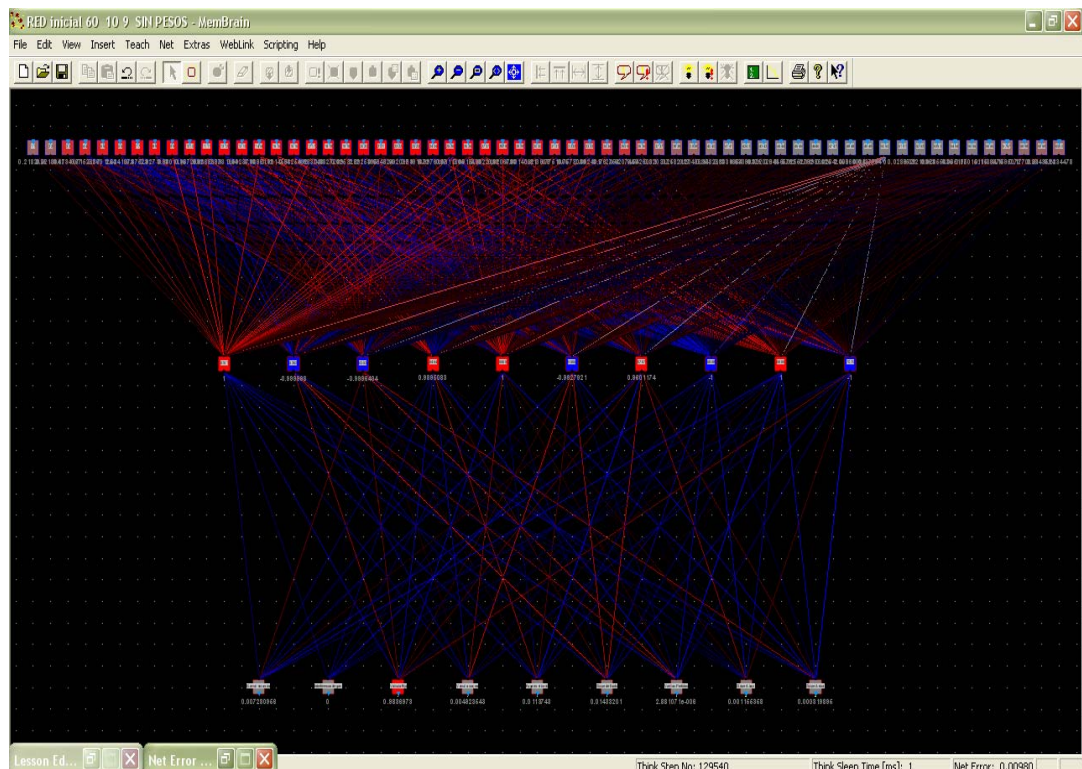
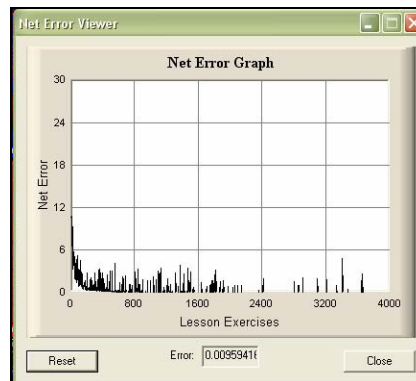


Figura 14. Error vs iteraciones la red 60:10:9 MemBrain



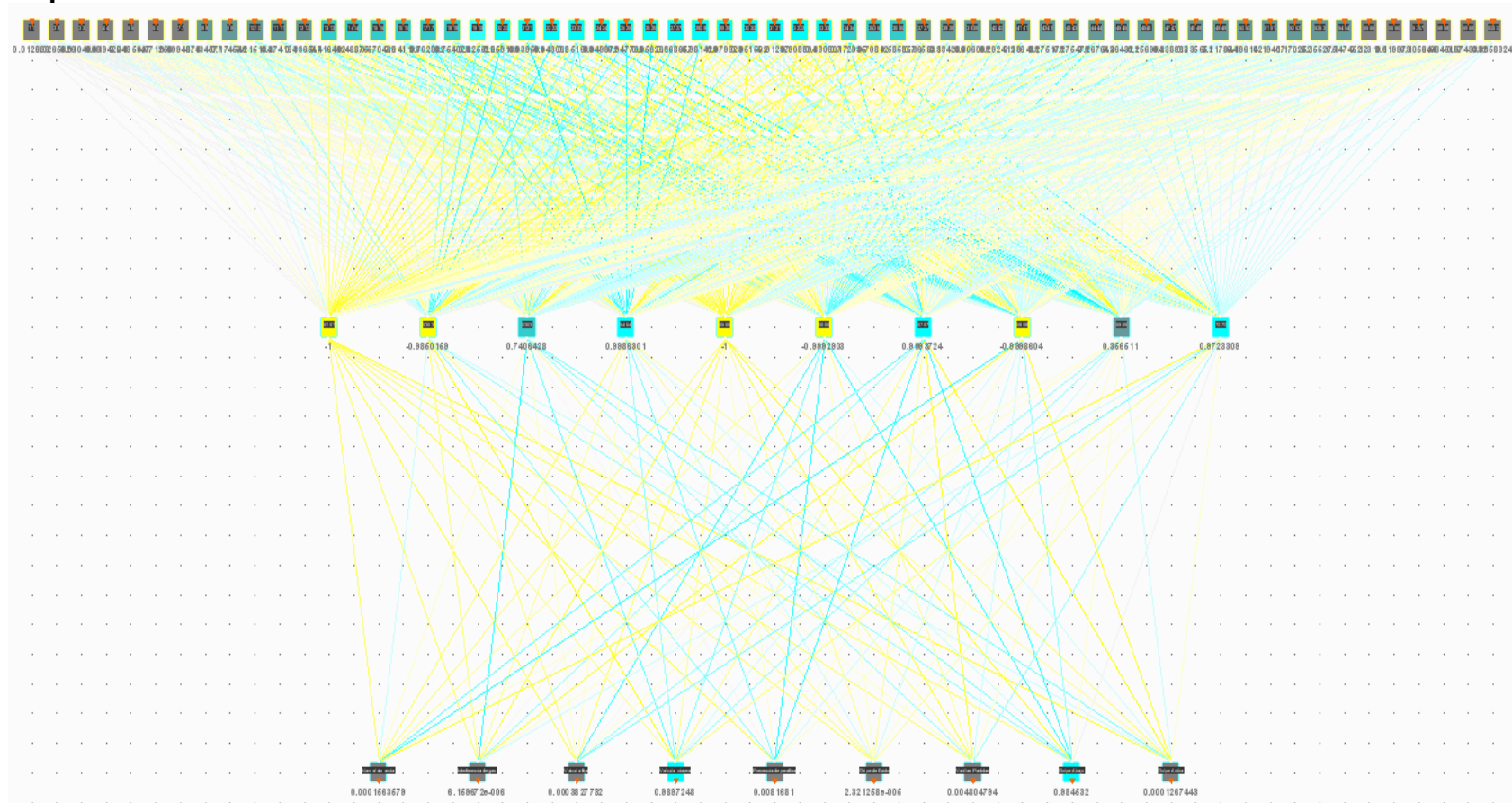
La prueba esta compuesta por 13 patrones de entrenamiento y 8 de prueba analizados por EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN DEL GAS Y DEL PETRÓLEO de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

Resultados de la prueba: Los resultados de la prueba son visualizados directamente en el software Membrain por cada dinagrama de prueba aprovechando la facilidad que presenta este para asignarle nombre a cada una de las neuronas de salida, de acuerdo con esto los resultados se mostraran por cada dinagrama de prueba con un "pantallazo" de las neuronas de salida en el capitulo 5 del presente estudio.

Los resultados son considerablemente buenos teniendo en cuenta que se esta logrando identificar dos problemas involucrados en una carta dinamométrica de una manera aceptable, demostrando que las modificaciones sobre la base de datos de entrenamiento son acertadas.

Anexo D. Visualización de la arquitectura de la red aplicada al campo-escuela Colorado y de sus resultados sobre la etapa de prueba y predicción.

Arquitectura de la red.



Visualización resultados sobre dinagramas prueba

Dinagrama de prueba 1



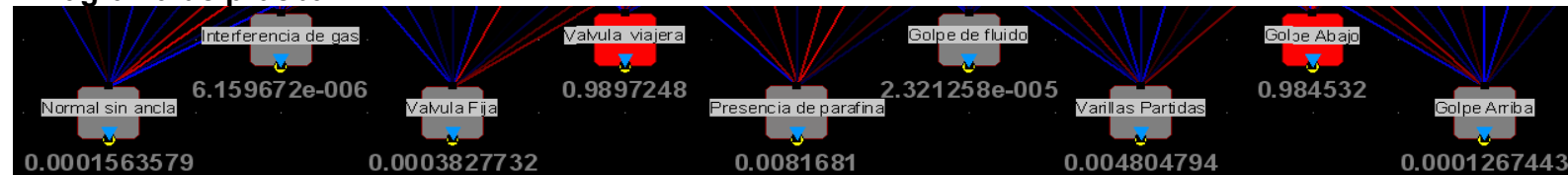
Dinagrama de prueba 2



Dinagrama de prueba 3



Dinagrama de prueba 4



Dinagrama de prueba 5



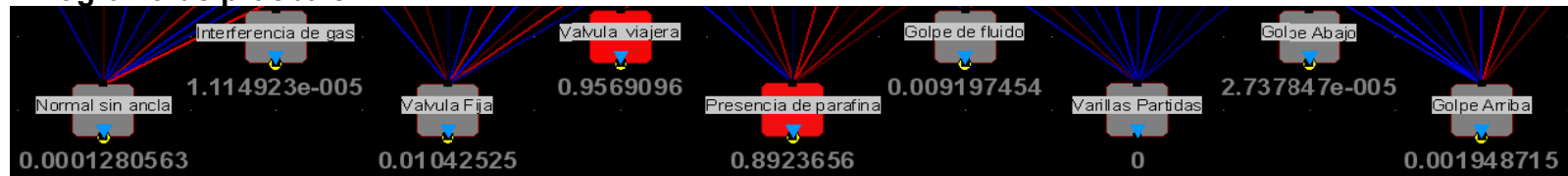
Dinagrama de prueba 6



Dinagrama de prueba 7



Dinagrama de prueba 8

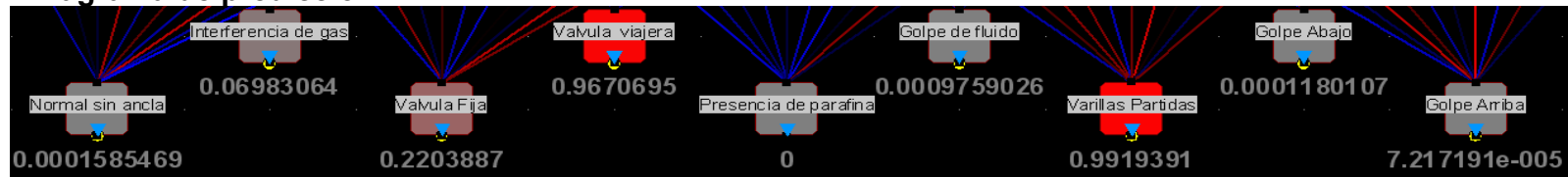


Visualización resultados sobre dinagramas de predicción:

Dinagrama de predicción 1



Dinagrama de predicción 2



Dinagrama de predicción 3



Dinagrama de predicción 4



Dinagrama de predicción 5



Dinagrama de predicción 6

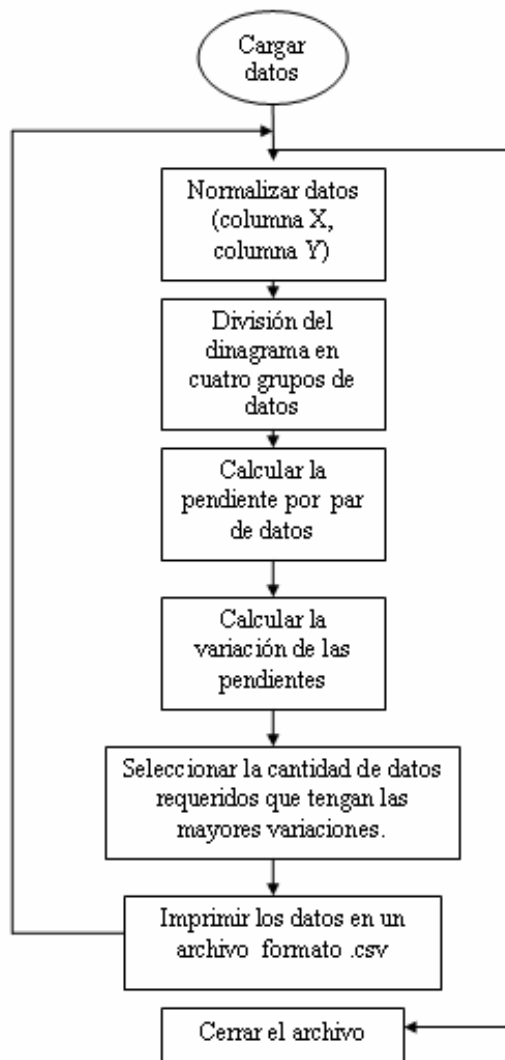


**Anexo E. MANUAL DE USUARIO PRE-PROCESADOR DE DINAGRAMAS
ECHOMETER - MEMBRAIN**

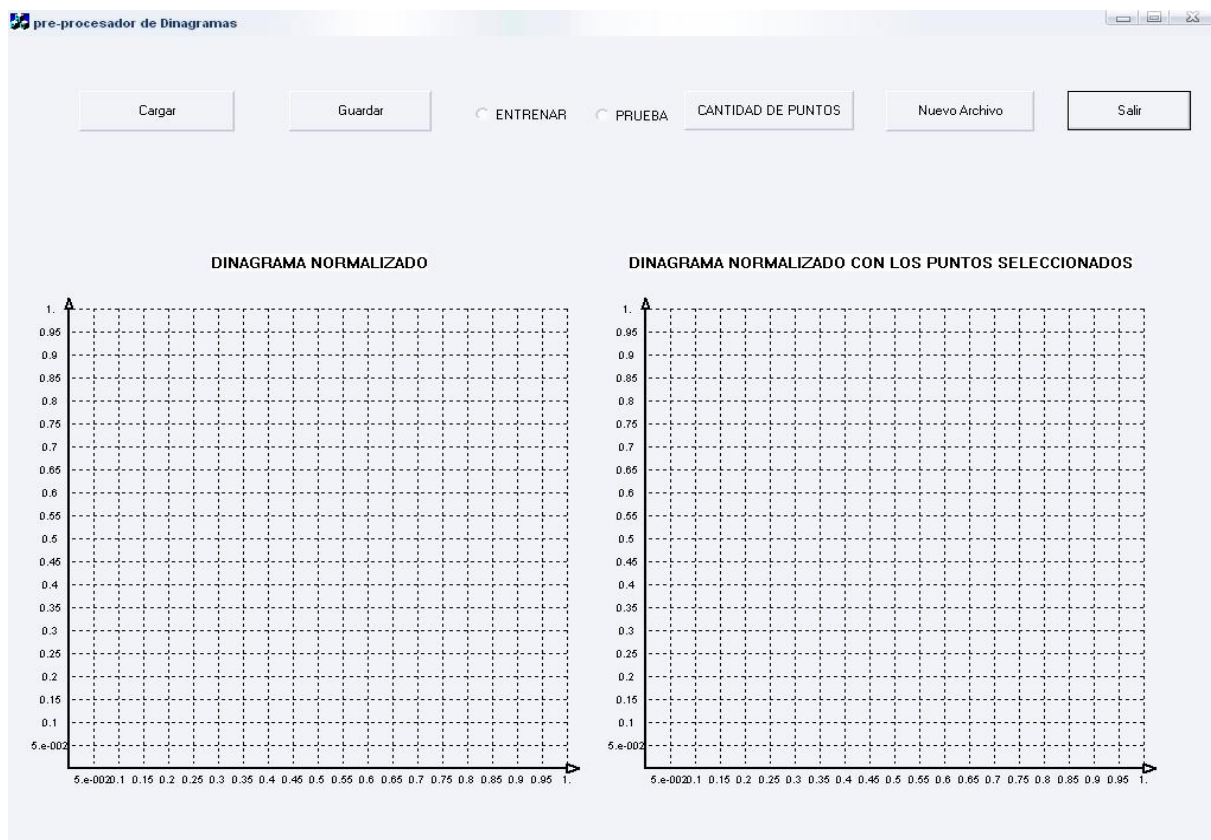
INTRODUCCIÓN

El PRE-PROCESADOR DE DINAGRAMA es una aplicación creada para tomar los datos extraídos del programa Echometer y realizarle una serie de procesos para pasarlos a un formato compatible con el software de redes neuronales MEMBRAN. Esta aplicación fue realizada en la plataforma de desarrollo VISUAL C++ 6.0 Versión Empresarial.

A continuación se presentará un diagrama del procedimiento interno en general que realiza la aplicación.

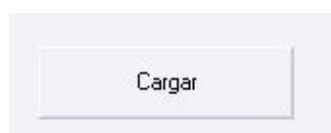


PANTALLA PRINCIPAL PRE-PROCESADOR DE DINAGRAMAS



El panel muestra dos plantillas de dibujos donde se graficará el dinagrama normalizado con todos sus puntos y el dinagrama normalizado con los puntos seleccionados.

Cuenta con los siguientes botones:



Este botón nos da la opción de buscar el archivo texto donde tenemos guardados los datos del dinagrama provenientes del Echometer.



Este botón de opción podemos seleccionar si el archivo a guardar es para entrenamiento de la RNA.



Este botón de opción podemos seleccionar si el archivo a guardar es para prueba con la RNA entrenada.



Este botón podemos cambiar la

cantidad de datos por intervalo, por defecto es 10-16-10-24.



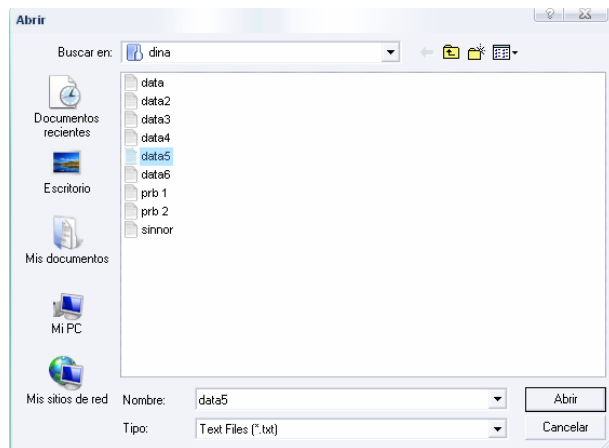
Este botón podemos culminar el trabajo de nuestro archivo actual cerrando el archivo con los dinagramas procesados y volviendo al panel como al inicio.



Con este botón podemos nombrar el archivo si iniciamos o guardar en uno abierto los dinagramas procesados.

Como ventanas secundarias tenemos:

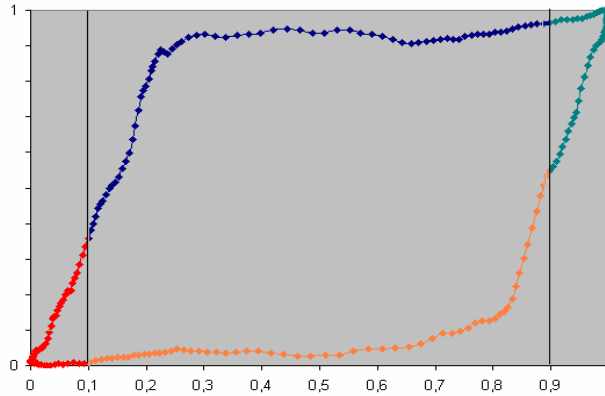
Ventana de abrir archivos: En esta ventana se activa con el botón cargar se busca y se selecciona el archivo texto donde esta contenido el dinagrama.



Ventana de selección de cantidad de puntos por intervalos: Esta ventana se activa solo cuando se ha cargado un dinagrama y conserva los valores hasta que se cierre el archivo que guarda los dinagramas procesados.

SELECCIÓN DE LA CANTIDAD DE PUNTOS					
	Sección Uno		Sección Dos		OK Cancel
0.1 - 0.1	10	0.1 - 0.9	16		
	Sección tres		Sección Cuatro		
0.9 - 0.9	10	0.9 - 0.1	24		

Las secciones que se enuncia en la anterior ventana están esquematizadas de la siguiente forma:



Ventana para las salidas de la RNA: Esta ventana se activa al oprimir el botón guardar y en ella se caracteriza los posibles problemas que pueden indicar el dinagrama. Si los problemas enunciados en esta ventana existen se escribe 1 de lo contrario es 0, puede existir el caso donde no sea necesario tener en cuenta todos los nueve problemas establecidos para ello se pueden deshabilitar escribiendo 2 en la respectiva casilla y de esta forma se mantendrá hasta que se cierre el archivo.

OUTPUTS NEUROHAL NETWORK

OUTPUTS

Normal sin ancla	Interferencia de gas	Valvula Fija	Valvula viajera	
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	
Fuga en el barril	Golpe de fluido	Varillas Partidas	Golpe Abajo	Golpe Arriba
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Nota: Para anular las salidas agregue en la casilla respectiva 2

OK Cancel

Ventana Guardar como: En esta ventana se activa con el botón Guardar y se despliega cuando se inicia el proceso de almacenamiento de los dinagramas procesados.

Guardar como

Guardar en: dino

Documentos recientes

- Datos_ecc_sinteticos
- Datos_prueba_colorado
- P1 60 10 9
- P1 60 10 test
- salida
- testentree

Mis documentos

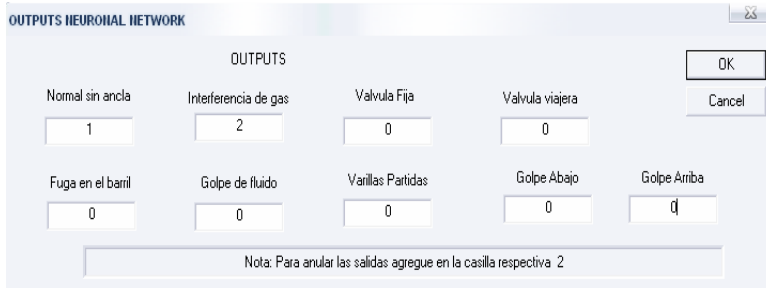
Mi PC

Mis sitios de red

Nombre:

Tipo: Text Files (*.csv)

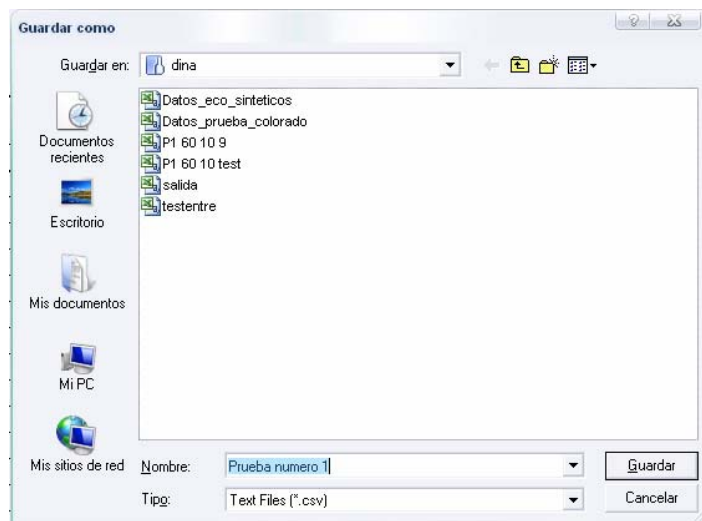
Guardar Cancelar



también supongamos que no requerimos el caso de INTERFERENCIA DE GAS entonces marcamos con un 2 esta casilla y el resto se dejan en 0.

Al oprimir OK en la ventana de salidas se despliega la ventana donde le daremos el nombre al archivo.

Para este caso lo llamaremos Prueba numero 1 en formato *.csv.



Oprimimos Guardar y aparecerá en pantalla la confirmación del procedimiento.



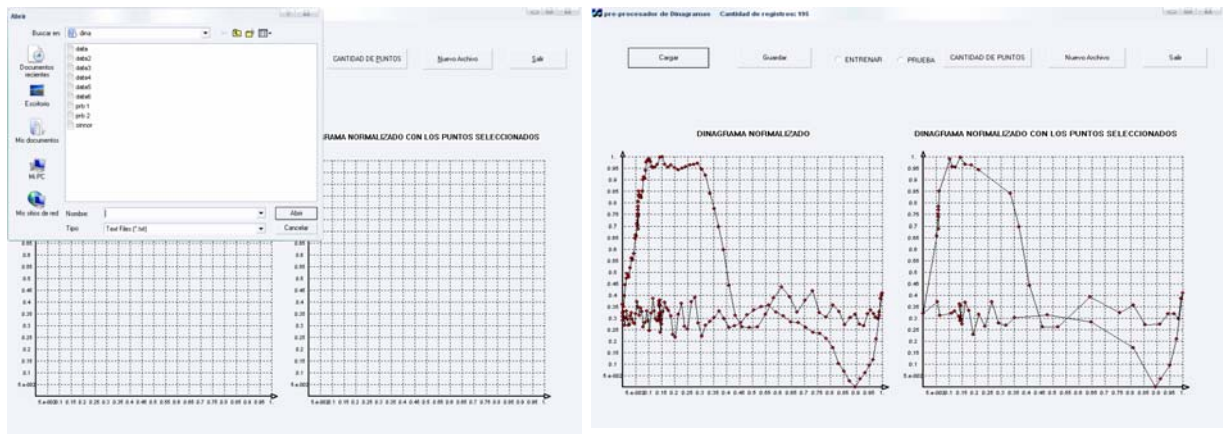
Oprimimos aceptar y continuamos cargando otro dinagrama. Cuando terminemos el proceso con este archivo de entrenamiento, cerramos el archivo ya sea oprimiendo el botón Nuevo archivo para continuar con otro proceso o el botón salir para cerrar la aplicación.



PROCESAMIENTO DE DINAGRAMAS PARA PRUEBAS

Ahora en este aparte desarrollaremos metódicamente el proceso que realiza para crear un archivo para prueba de una RNA entrenada.

2. Cargar datos



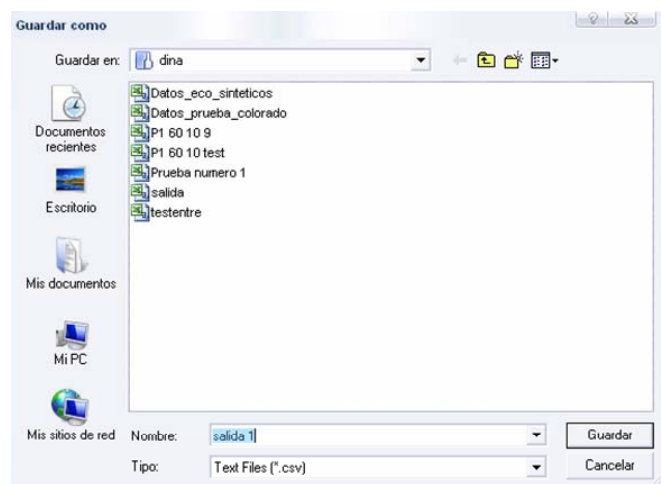
Cargamos los datos como lo enunciamos anteriormente.



Seleccionamos el botón de opción prueba.

Después procedemos a guardar el dinagrama procesado. Con la diferencia que esta vez no se desplegará la ventana de salidas, si no la ventana donde le daremos el nombre al archivo.

Para este caso lo llamaremos salida 1 en formato *.csv. y damos guardar.



Oprimimos Guardar y aparecerá en pantalla la confirmación del procedimiento.



Oprimimos aceptar y continuamos cargando otro dinagrama. Cuando terminemos el proceso con este archivo de entrenamiento, cerramos el archivo ya sea oprimiendo



el botón Nuevo archivo para continuar con otro proceso o el botón salir para cerrar la aplicación.

RECOMENDACIONES

Esta aplicación toma los datos de archivos texto donde se han copiado los datos extraídos del Echometer, por lo tanto donde estos datos no se han copiados adecuadamente producirán errores que serán evidentes tanto en el despliegue grafico como en los archivos que genere esta aplicación.

El formato decimal que toma la aplicación del archivo texto es separado por puntos (.), por lo general el Echometer o excell el formato decimal viene separado en comas (,), por lo tanto es necesario hacer esta conversión.