

DISEÑO DE UN SISTEMA EXPERTO EN MANTENIMIENTO E
IMPLEMENTACION EN UN SISTEMA DE INGENIERIA

DANIEL ESCOBAR VILLEGAS

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
MEDELLIN
2008

DISEÑO DE UN SISTEMA EXPERTO EN MANTENIMIENTO E
IMPLEMENTACION EN UN SISTEMA DE INGENIERIA

DANIEL ESCOBAR VILLEGAS

Proyecto de grado para optar al titulo de Ingeniero Mecanico

RONALD MAURICIO MARTINOD
ASESOR

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
MEDELLIN
2008

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Medellín, 5 de agosto de 2008.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar sus agradecimientos a Ronald Martinod, asesor del proyecto de grado, Leonel Castañeda coordinador del Grupo de Investigación en Mantenimiento Industrial – GEMI y cada uno de sus integrantes sin cuya colaboración no habría sido posible la realización de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
CONTENIDO	5
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABLAS	13
LISTA DE ECUACIONES	14
1 INTRODUCCION	14
2 ANTECEDENTES	15
3 JUSTIFICACION	16
4 OBJETIVOS	17
4.1 GENERAL	17
4.2 ESPECIFICOS	17
5 INTELIGENCIA ARTIFICIAL	18
5.1 HISTORIA	18
5.2 DEFINICION	19
5.3 CLASIFICACION	21
5.3.1 Inteligencia Artificial Convencional	21
5.3.2 Inteligencia Computacional	22
6 REDES NEURONALES	25
6.1 HISTORIA	25
6.2 DEFINICION	26
6.2.1 Funciones de Activación	29
6.2.1.1 Función de Activación Lineal	29
6.2.1.2 Función de Activación de Umbral de Paso	30
6.2.1.3 Función de Activación de Rampa No Lineal o Seudolineal	32
6.2.1.4 Función de Activación de Umbral Sigmoidal	33
6.2.2 Estructuras Neuronales	34
6.2.2.1 Redes Neuronales Hacia Adelante de una Sola Capa	35

6.2.2.2	Redes Neuronales Hacia Adelante Multicapa	36
6.2.2.3	Redes Neuronales Recurrentes	37
6.3	APLICACIONES	38
6.4	INSTITUTOS QUE TRABAJAN CON REDES NEURONALES	39
6.4.1	INSTITUTE FOR NEURAL COMPUTATION	39
6.4.2	NEURAL NETWORK RESEARCH GROUP	40
7	SISTEMAS DIFUSOS	41
7.1	HISTORIA	41
7.2	DEFINICION	41
7.2.1	Incertidumbre Estocástica	42
7.2.2	Incertidumbre Léxica	42
7.2.3	Lógica Difusa	43
7.3	APLICACIONES	47
7.4	INSTITUTOS QUE TRABAJAN CON SISTEMAS DIFUSOS	48
7.4.1	FUZZY SYSTEMS RESEARCH GROUP	48
7.4.2	THE FUZZY SYSTEMS RESEARCH GROUP	49
8	REDES BAYESIANAS	50
8.1	HISTORIA	50
8.2	DEFINICION	50
8.2.1	Aspectos Básicos de las Redes Bayesianas	51
8.2.2	Redes Bayesianas Como Sistemas Expertos Probabilísticos	52
8.3	APLICACIONES	54
8.4	INSTITUTOS QUE TRABAJAN CON REDES BAYESIANAS	55
8.4.1	DAGS	55
9	SISTEMAS EXPERTOS	56
9.1	HISTORIA	56
9.1.1	Etapa de Invención	56
9.1.2	Etapa de Prototipos	56
9.1.3	Etapa de Experimentación	56
9.1.4	Etapa de Industrialización	57
9.2	DEFINICION	57

9.3	CARACTERISTICAS	57
9.4	COMPONENTES DE UN SISTEMA EXPERTO	59
9.4.1	Base de Conocimientos	59
9.4.2	Mecanismo de Inferencia	61
9.4.3	Memoria de Trabajo	61
9.4.4	Interfaces	61
9.4.5	Subsistema de Explicación	62
9.4.6	Subsistema de Aprendizaje	62
9.5	CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA EXPERTO	62
9.6	APLICACIONES	63
9.6.1	Monitorización	63
9.6.2	Diseño	63
9.6.3	Planificación	64
9.6.4	Control	65
9.6.5	Simulación	65
9.6.6	Instrucción	66
9.6.7	Recuperación de información	66
9.6.8	Aplicaciones de los Sistemas Expertos en el Campo del Mantenimiento Industrial	67
9.7	INSTITUTOS QUE TRABAJAN CON SISTEMAS EXPERTOS	68
9.7.1	BERKELEY EXPERT SYSTEMS TECHNOLOGY – BEST	68
9.7.2	GRUPO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL	69
10	PAQUETES COMPUTACIONALES.	70
10.1	ACQUIRE	70
10.1.1	Fortalezas	71
10.1.2	Debilidades	72
10.1.3	Requerimientos del Sistema	72
10.1.4	Costo	72
10.1.5	Contacto	73
10.2	CORVID	73
10.2.1	Fortalezas.	73
10.2.2	Debilidades	74
10.2.3	Requerimientos del Sistema	74
10.2.4	Costo	75
10.2.5	Contacto	75
10.3	JESS	75

10.3.1	Fortalezas	75
10.3.2	Debilidades	76
10.3.3	Requerimientos del Sistema	76
10.3.4	Costo	76
10.3.5	Contacto	77
10.4	COMPARACION DE SOFTWARE	77
11	HERRAMIENTA COMPUTACIONAL	81
11.1	INTRODUCCION	81
11.2	FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA	81
11.3	COMPONENTES PRINCIPALES DE LA HERRAMIENTA	82
11.3.1	Reglas	82
11.3.2	Mecanismo de Inferencia	83
11.3.3	Encadenamiento Hacia delante o Hacia Atrás	84
11.3.3.1	Encadenamiento Hacia Delante	85
11.3.3.2	Encadenamiento Hacia Atrás	86
11.3.4	Tipos de Variables	87
11.3.5	Bloques Lógicos	88
11.3.6	Bloques de Acción	89
11.3.7	Bloques de Comando	89
11.4	COMPARACION HERRAMIENTA COMPUTACIONAL CON LA TEORIA DE SISTEMAS EXPERTOS	90
11.4.1	Base de Conocimientos	90
11.4.2	Mecanismo de Inferencia	90
11.4.3	Memoria de trabajo	91
11.4.4	Interfaces	91
11.4.5	Subsistema de Explicación	91
11.4.6	Subsistema de Aprendizaje	92
12	METODOLOGIA PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO CON LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL SELECCIONADA.	93
12.1	PROTAGONISTAS	93
12.1.1	Desarrollador	93
12.1.2	Experto	93
12.1.3	Usuario	94
12.1.4	Administración	94

12.2	METODOLOGIA	94
12.2.1	Determinar el problema específico	95
12.2.2	Determinar la estructura del sistema	96
12.2.3	Determinar el grupo de expertos	98
12.2.4	Documentar los Pasos Realizados por el Experto para Resolver el Problema	99
12.2.4.1	Adquisición de Conocimientos	99
12.2.5	Construcción del Sistema Experto	106
12.2.6	Verificación del Sistema Experto	107
12.2.7	Mantenimiento del Sistema Experto	108
13	DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO APLICADO A UN SISTEMA FERROVIARIO	110
13.1	OBJETO DE ESTUDIO	110
13.2	SISTEMAS DE LOS VEHICULOS PARA PASAJEROS	112
13.3	DESCRIPCION DEL SISTEMA DE VIA PERMANENTE	113
13.4	DESCRIPCION DE LAS RUEDAS	116
13.5	FUERZAS DE INTERACCION RUEDA-RIEL	117
13.5.1	Fuerzas Verticales	118
13.5.2	Fuerzas Axiales	120
13.5.3	Fuerzas Longitudinales	121
13.5.4	Otras Fuerzas	121
13.6	INDICE Y CRITERIOS DE SEGURIDAD EN MARCHA VEHICULOS FERROVIARIOS	122
13.6.1	Escalamiento de Pestaña	122
13.6.2	Criterios de Seguridad para el Escalamiento de Pestaña	123
13.6.2.1	Criterio de limite Y/Q para una rueda de Nadal	124
13.6.2.2	Criterio de Límite de la Suma de Y/Q de Todos los Ejes de Weinstock	125
13.6.2.3	Criterio de Chartet	126
13.6.3	Aplicación de los Criterios de Seguridad para el Escalamiento de Pestaña	126
13.6.3.1	Escalamiento de Pestaña Debido a Bajos Ángulos de Pestaña	126
13.6.3.2	Incremento en la Longitud de la Pestaña	127
13.6.3.3	Escalamiento de Pestaña Debido a Altos Coeficientes de Fricción	127
13.7	PREGUNTAS PARA EL SISTEMA EXPERTO	128
13.8	SISTEMA PARA EVALUAR EL INDICE DE SEGURIDAD EN MARCHA DE VEHICULOS FERROVIARIOS SEGUN EL CRITERIO DE NADAL	129
13.8.1	Descripción del Sistema	129

13.8.2	Variables del Sistema	130
13.8.3	Fuerzas Laterales y Verticales para el Sistema	132
13.8.4	Estructura del sistema	133
13.8.5	Evaluación del Índice de Seguridad Mediante un Sistema Experto	134
13.8.6	Presentación de Resultados	136
13.8.6.1	Resultados Bajo Condiciones Optimistas	136
13.8.6.2	Resultados Bajo Condiciones Pesimistas	137
14	CONCLUSIONES	140
15	RECOMENDACIONES	142
16	NUEVAS LINEAS DE INVESTIGACION	143
17	BIBLIOGRAFIA	144
17.1	CLASICA	144
17.2	INTERNET	147
18	ANEXOS	148
18.1	ANEXO 1- SISTEMA EXPERTO PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE UNA CENTRAL HIDROELECTRICA	148
18.2	ANEXO 2 - SISTEMA EXPERTO DE AYUDA AL MANTENIMIENTO DE OSCILOSCOPIOS ANALOGICOS	159
18.3	ANEXO 3- SISTEMA EXPERTO PARA EL MONITOREO DE CONDICIONES EN MÁQUINAS ROTATIVAS.	167
18.4	ANEXO 4- FUZZY NONLINEAR REGRESSION MODEL FOR RAILWAYS RIDE QUALITY	171
18.5	ANEXO 5- REGLAS DEL SISTEMA EXPERTO	171
18.6	ANEXO 6 – FUERZAS LATERALES Y VERTICALES OBTENIDAS EXPERIMENTALMENTE	189
18.7	ANEXO 7 – CARACTERISTICAS TIPICAS DE UNA UNIDAD	189

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Ilustración 1. Enfoques Inteligencia Artificial	20
Ilustración 2. Diagrama Inteligencia Artificial	24
Ilustración 3. Modelo de una Neurona.	27
Ilustración 4. Modelo de una neurona artificial.	28
Ilustración 5. Función de Activación Lineal.	30
Ilustración 6. Función de Activación de Umbral de Paso.	31
Ilustración 7. Función de Activación de Rampa No Lineal.	32
Ilustración 8. Función de Activación de Umbral Sigmoidal.	34
Ilustración 9. Red Neuronal Hacia Adelante de una Sola Capa.	35
Ilustración 10. Red Neuronal Hacia Adelante Multicapa.	36
Ilustración 11. Red Neuronal Recurrente Sin Autorealimentacion ni Capas Ocultas.	37
Ilustración 12. Red Neuronal Recurrente Con Autorealimentacion y Capas Ocultas.	38
Ilustración 13. Arreglo Convencional para un Conjunto de Temperaturas Corporales	44
Ilustración 14. Arreglo Difuso de Pacientes con “Fiebre Alta”	44
Ilustración 15. Función Continua Del Caso de Fiebre Alta.	45
Ilustración 16. Función Continua Del Caso de Fiebre Para Varias Temperaturas y Clasificaciones.	46
Ilustración 17. Representación grafica de un modelo de probabilidad simple.	51
Ilustración 18. Estructura Básica de un Sistema Experto.	60
Ilustración 19. Criterios de Selección de Software	70
Ilustración 20. Diagrama Funcionamiento de la Herramienta Computacional.	82
Ilustración 21. Diagrama Encadenamiento Hacia Delante	85
Ilustración 22. Diagrama Encadenamiento Hacia Atrás	87
Ilustración 23. Diagrama Metodología para el desarrollo de sistemas expertos.	95
Ilustración 24. Aplicaciones de los sistemas expertos en el mantenimiento de sistemas técnicos.	96
Ilustración 25. Diseño de la arquitectura del sistema experto.	97
Ilustración 26. Pasos Para Determinar los Expertos en Mantenimiento.	98
Ilustración 27. Tipos de Conocimientos del Experto.	100
Ilustración 28. Fase 1 adquisición de conocimiento.	100
Ilustración 29. Fase 2 adquisición de conocimiento.	101
Ilustración 30. Fase 3 adquisición de conocimiento.	102
Ilustración 31. Esquema de preparación de las sesiones.	102
Ilustración 32. Esquema de las sesiones.	103

Ilustración 33. Diagrama de construcción del sistema experto.	106
Ilustración 34. Evaluación del sistema experto.	107
Ilustración 35. Mantenimiento del Sistema Experto	108
Ilustración 36. Dimensiones generales del vehículo	110
Ilustración 37. Esquema general de la superestructura de la vía	114
Ilustración 38. Configuración típica de la vía	114
Ilustración 39. Esquema de un cambiavías	115
Ilustración 40. Parámetros del perfil de rueda	116
Ilustración 41. Fuerzas cuasi-estáticas del vehículo en una curva	119
Ilustración 42. Fuerzas en el punto de contacto de la pestaña	124
Ilustración 43. Ruedas con ángulos de pestaña de 63° y 75°	126
Ilustración 44. Longitud de Pestaña	127
Ilustración 45. Configuración del montaje para la medición de fuerzas rueda-riel	133
Ilustración 46. Entradas y salidas del sistema	133
Ilustración 47. Diagrama de flujo de información del sistema	134
Ilustración 48. Primeros 4 pasos del sistema	135
Ilustración 49. Segundos 4 pasos del sistema	136
Ilustración 50. Pantalla de resultados bajo condiciones optimistas	137
Ilustración 51. Pantalla de resultados bajo condiciones pesimistas	138

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Inteligencia Artificial Convencional Vs Inteligencia Computacional.	22
Tabla 2. Comparación Software	80
Tabla 3. Características básicas de la unidad	110
Tabla 4. Cargas de los coches y la unidad	111
Tabla 5. Sistema de control del vehículo	111
Tabla 6. Datos técnicos de la vía permanente	115
Tabla 7. Variables utilizadas en el sistema	130

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Suma ponderada de las entradas de la red neuronal	29
Ecuación 2. Ecuación para obtener la salida de la red neuronal	29
Ecuación 3. Función de activación de umbral de paso	30
Ecuación 4. Función de activación de umbral de paso con valores binarios	31
Ecuación 5. Función de activación de umbral de paso bipolar	31
Ecuación 6. Función de activación de rampa no lineal	32
Ecuación 7. Función de activación de rampa no lineal con valores binarios	33
Ecuación 8. Función de activación de umbral sigmoidal	33
Ecuación 9. Función de activación de umbral sigmoidal con tangente hiperbólica	34
Ecuación 10. Ángulo de la pestaña de la rueda	116
Ecuación 11. Fuerza vertical sobre el riel	118
Ecuación 12. Fuerzas verticales estáticas y centrífugas sobre el vehículo	119
Ecuación 13. Deficiencia de peralte	119
Ecuación 14. Fuerzas axiales	120
Ecuación 15. Fuerza lateral máxima	120
Ecuación 16. Fuerza lateral multiplicada por el factor de amplificación dinámico	120
Ecuación 17. Incremento en longitud de riel	121
Ecuación 18. Fuerza normal en el área de contacto	124
Ecuación 19. Fuerza tangencial en el área de contacto	125
Ecuación 20. Relación de fuerza lateral y fuerza vertical	125
Ecuación 21. Relación Y/Q con $F_2/F_3=\mu$	125
Ecuación 22. Relación Y/Q teórica	130

1 INTRODUCCION

Los sistemas expertos son una rama de la inteligencia artificial que se encarga de emular el proceso de razonamiento humano para la solución de problemas específicos para los cuales fue programado, teniendo en cuenta los conocimientos previos adquiridos por expertos humanos y representados en el programa por medio de reglas.

Se realizará una revisión de los aportes de la inteligencia artificial en el campo de los diagnósticos técnicos, médicos etc. Para ello se realizara una conceptualización de lo que significa inteligencia artificial, la clasificación y ramas de esta.

Los sistemas expertos son una rama de la inteligencia artificial, y será en esta en la cual se enfocara este trabajo, con el fin de obtener conocimientos sobre los sistemas expertos para luego ver los aportes que han hecho estos al mantenimiento y la aplicación que pueden tener estos dentro de esta línea de énfasis de la ingeniería mecánica.

En el mercado actual se ofrecen varios paquetes computacionales que permiten construir sistemas expertos. Para determinar que paquete es el más adecuado para la construcción de un sistema experto en mantenimiento, se realizara una revisión de los paquetes más comerciales y así tener herramientas para escoger el más conveniente para el proyecto.

El fin de este trabajo es la construcción de un sistema experto en mantenimiento y su aplicación en el índice de seguridad en marcha de vehículos ferroviarios.

2 ANTECEDENTES

La inteligencia artificial se empezó a desarrollar a partir de la década de 1940, pero es descrita formalmente en el año de 1956, año en que John McCarthy introdujo dicho término en una conferencia sobre informática en el colegio de Dartmouth. A partir de este tiempo con los avances tecnológicos en hardware y lenguajes de programación, ha sido muy grande el avance que ha tenido la inteligencia artificial en el área de los sistemas expertos.

La inteligencia artificial está clasificada en dos grupos que son inteligencia artificial convencional e inteligencia computacional. La inteligencia artificial convencional a su vez comprende varios métodos de estudio los cuales son: sistemas expertos, razonamiento basado en el caso, redes Bayesianas, inteligencia artificial basada en el comportamiento. Los sujetos de la inteligencia computacional básicamente son: redes neuronales, sistemas difusos, computación evolutiva. También existen sistemas inteligentes híbridos dentro de la inteligencia artificial. Estos sistemas son construidos con la combinación de estos dos grupos.

Los sistemas expertos empezaron a desarrollarse aproximadamente hacia el año de 1965 basados en la necesidad de construir un sistema que emule el funcionamiento del cerebro humano para solucionar problemas comunes de un área específica basada en conocimientos previamente adquiridos. A partir de este momento, se han desarrollado numerosos sistemas expertos que ayudan a avanzar en la tecnificación de campos como la medicina, química, agricultura, educación e ingeniería.

3 JUSTIFICACION

Se realizara un análisis de lo que son los sistemas expertos actualmente y como ha sido su evolución en el tiempo, el uso que se puede dar a estos en el mantenimiento de sistemas de ingeniería, para luego evaluar paquetes computacionales comerciales para el desarrollo de sistemas expertos y elegir el más adecuado para las necesidades de diseñar un sistema experto en el mantenimiento de un sistema de ingeniería.

Los sistemas expertos aplicados al mantenimiento, son un gran paso en la implementación de los avances tecnológicos a un campo como el mantenimiento, para así incrementar el desempeño de este dentro de la industria.

4 OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Construir un sistema experto en mantenimiento de un sistema de ingeniería.

4.2 ESPECIFICOS

- Conocer acerca de la inteligencia artificial, sus clasificaciones y ramas para enfocarse en los sistemas expertos.
- Identificar los aportes que han hecho los sistemas expertos dentro del mantenimiento industrial.
- Reconocer los paquetes computacionales comerciales para el desarrollo de sistemas expertos.
- Seleccionar un paquete computacional con alta compatibilidad y aplicabilidad dentro del diseño de un sistema experto en mantenimiento de un sistema de ingeniería.
- Diseñar y construir un sistema experto en mantenimiento de un sistema de ingeniería.
- Implementar el sistema experto en mantenimiento de un sistema de ingeniería.

5 INTELIGENCIA ARTIFICIAL

5.1 HISTORIA

La inteligencia artificial, comienza a partir de la década de 1940 y se ha desarrollado enormemente hasta el presente con el surgimiento de los agentes inteligentes.

La gestación de la inteligencia artificial (1943- 1955):

Warren McCulloch y Walter Pitts fueron los pioneros, ellos se basaron en tres fuentes: El conocimiento de la fisiología y funciones básicas de las neuronas del cerebro; un análisis formal de la lógica proposicional hecha por Russell y Whitehead; y la teoría de computación de Turing. Ellos propusieron un modelo de neuronas artificiales en el cual cada neurona se caracteriza por estar “activa” o “inactiva” (“on” u “off”), con un cambio a “activa” en respuesta al estímulo de un número suficientes de neuronas vecinas. Donald Hebb en 1949, demostró una regla de actualización para modificar los pesos de las conexiones entre neuronas. Su regla ahora llamada aprendizaje de Hebbian (“Hebbian Learning”), tiene una gran influencia actualmente.

En 1950 dos estudiantes de Harvard, Marvin Minsky y Dean Edmonds, construyeron la primer computadora de redes neuronales.

Estudiosos del tema realizaron grandes trabajos en inteligencia artificial, fue Alan Turing el primero en articular una visión completa de inteligencia artificial en su artículo “Computing Machinery and Intelligence” (Maquinaria Computacional e Inteligencia) de 1950. Luego el mismo introdujo el test de Turing, máquinas de aprendizaje, algoritmos genéticos y refuerzo del conocimiento.

El término inteligencia artificial, fue introducido por John McCarthy en una conferencia sobre informática en Darmouth Collage, de 1956. McCarthy reunió a investigadores interesados en los temas de la teoría autómatas, redes neuronales y el estudio de la inteligencia. Figuras como Marvin Minsky, Claude Shannon y Nathaniel Rochester pertenecieron al estudio de McCarthy. Todos ellos se conocen como los pioneros de la inteligencia artificial. Allen Newel y

Herbert Simon del Carnegie Mellon University, en 1956, desarrollaron un programa computacional llamado Logic Theorist, el cual según sus autores era capaz de pensar no-numéricamente y probar teoremas matemáticos. Luego de estos adelantos primarios, vino una serie de desarrollos que han llevado la inteligencia artificial a desarrollar lo que hoy se conoce como agentes inteligentes, los cuales fuera de actuar de la mejor manera posible, pueden actuar bajo control autónomo, percibir su ambiente, persistir a través de un largo periodo de tiempo, adaptarse al cambio y ser capaces de plantearse otras metas.

5.2 DEFINICION

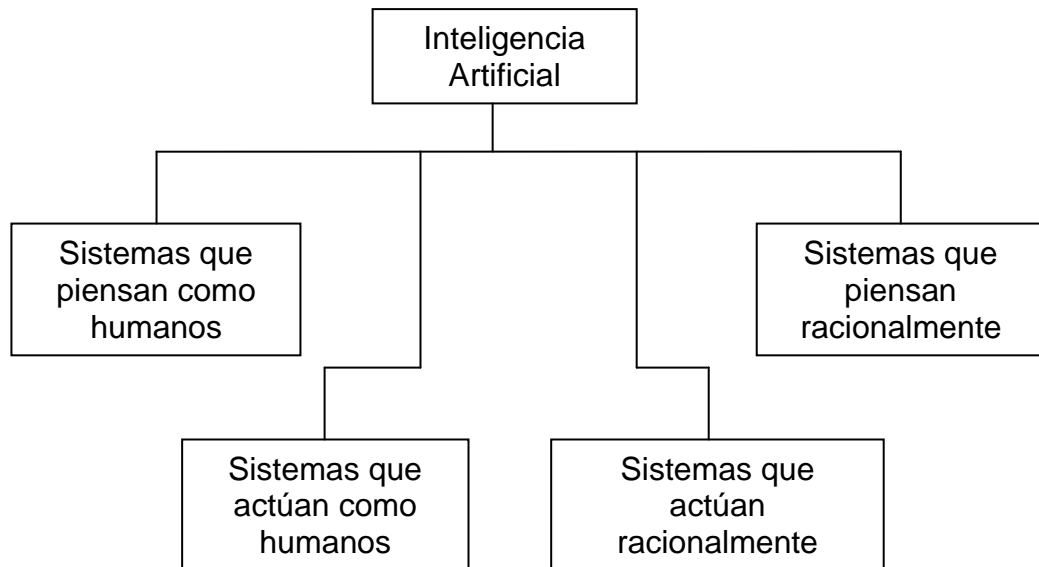
El término inteligencia artificial no es fácil de definir, ya que existen una gran cantidad de conceptos que se han ido acumulando en la última mitad de siglo. A continuación se verán algunas de ellas:

- Según John McCarthy introductor del término, inteligencia artificial es “la ciencia e ingeniería de fabricar máquinas inteligentes” (1956).
- Habilidad del computador para simular el pensamiento humano (LONDOÑO, 1988, 1).
- El estudio de las facultades mentales a través del uso de modelos computacionales (LONDOÑO, 1988,2).
- Grupo de técnicas de software que incrementan la productividad humana permitiéndole al computador trabajar de una manera muy similar al hombre (LONDOÑO, 1998, 1).
- Rama de la ciencia computacional cuyo objeto de estudio es el diseño e implementación de programas capaces de emular las habilidades cognitivas humanas como la resolución de problemas, percepción visual y entendimiento de lenguajes (JACKSON, 1990, 3).

Las definiciones de la inteligencia artificial se pueden clasificar según los enfoques de los autores en cuatro grupos principales: Sistemas que piensan como humanos, sistemas que piensan racionalmente (entiéndase racionalmente como un concepto ideal de inteligencia), sistemas que actúan

como humanos y sistemas que actúan racionalmente. Véase Ilustración 1 (RUSELL, NORVIG, 2003).

Ilustración 1. Enfoques Inteligencia Artificial



Se darán dos definiciones según diferentes autores de cada uno de estos enfoques.

Sistemas que piensan como humanos:

- La automatización de actividades que se asocian con el pensamiento humano, actividades tales como toma de decisiones, solución de problemas, aprendizaje (Bellman, 1978).
- El excitante esfuerzo de hacer pensar a las computadoras, máquinas con mentes, en el sentido completo y literal (Haugeland, 1985).

Sistemas que actúan como humanos:

- El arte de crear máquinas que desempeñan funciones que requieren inteligencia cuando son desempeñadas por humanos (Kurzweil, 1990).

- El estudio de cómo hacer que las computadoras realicen funciones para las cuales los humanos son mejores actualmente (Rich and Knight, 1991).

Sistemas que piensan racionalmente:

- El estudio de las facultades mentales a través de modelos computacionales (Charniak and McDermott, 1985).
- El estudio de las computaciones que hacen posible percibir, razonar y actuar (Winston, 1992).

Sistemas que actúan racionalmente:

- Inteligencia computacional es el estudio del diseño de agentes inteligentes (Poole, 1998).
- Inteligencia artificial está relacionada con el comportamiento inteligente de artefactos (Nilsson, 1998).

5.3 CLASIFICACION

La inteligencia artificial se clasifica básicamente en dos grupos que son inteligencia artificial convencional e inteligencia computacional. Véase

A continuación se profundizará acerca de algunas de las subdivisiones de la inteligencia artificial que son más relevantes para el proyecto, debido a la naturaleza del proyecto y del avance tecnológico y en investigación en estas, las cuales son redes neuronales, sistemas difusos, redes bayesianas y sistemas expertos.

Ilustración 2 y Tabla 1.

5.3.1 Inteligencia Artificial Convencional. Comprende varios métodos de estudio entre los cuales se encuentran:

- Razonamiento basado en el caso: Almacena un conjunto de problemas y soluciones organizadas en una estructura de datos llamada casos. El

sistema busca un caso en su base de datos que se encuentre estrechamente relacionado con el nuevo problema y presenta sus soluciones como una salida con algunas modificaciones.

- Redes Bayesianas: Modelo gráfico probabilístico que representa un conjunto de variables y sus independencias probabilísticas.
- Inteligencia artificial basada en el comportamiento: Método modular de construcción de sistemas de inteligencia artificial a mano.
- Sistemas Expertos: Aplicación computarizada, la cual resuelve operaciones y problemas complicados que de otra forma requeriría de los conocimientos de expertos en el tema para resolverlos (WIKI1@, 2008).

5.3.2 Inteligencia Computacional. Se divide en:

- Redes neuronales: Sistemas entrenables con grandes capacidades de reconocimiento de patrones.
- Sistemas difusos: Técnicas de razonamiento bajo incertidumbre, han sido ampliamente utilizados en la moderna industria de productos de consumo y sistemas de control; Capaz de trabajar con conceptos como 'caliente', 'frío', 'tibio' y 'ebullición'.
- Computación evolutiva: Aplica conceptos inspirados biológicamente tales como la población, la mutación y la supervivencia de los más aptos para generar cada vez mejores soluciones al problema. Se dividen en algoritmos evolutivos (por ejemplo, algoritmos genéticos) y de inteligencia de enjambre (por ejemplo, algoritmos de hormiga) (WIKI1@, 2008).

También existen sistemas inteligentes híbridos dentro de la inteligencia artificial. Estos sistemas son construidos con la combinación de estos dos grupos.

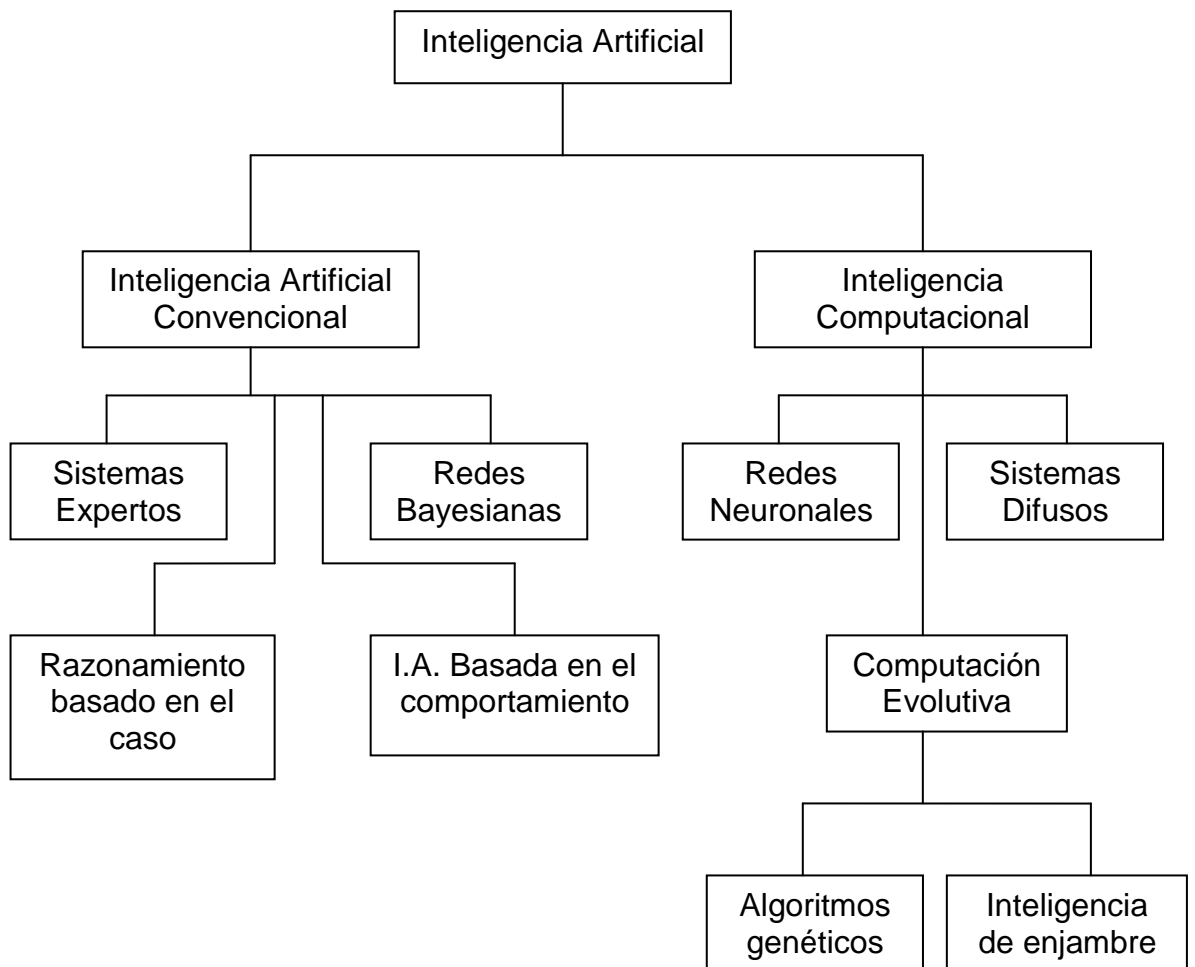
Tabla 1. Inteligencia Artificial Convencional Vs Inteligencia Computacional.

CARACTERISTICAS	INTELIGENCIA ARTIFICIAL	
	CONVENCIONAL	COMPUTACIONAL
SE CONOCE	IA simbólico-deductiva e	IA subsimbólica-inductiva e

	IA débil.	IA fuerte.
FUNDAMENTOS	Se fundamenta en el análisis formal y estadístico del comportamiento humano ante diferentes problemas.	Implica desarrollo o aprendizaje iterativo. El aprendizaje se realiza basándose en datos empíricos
CARACTERISTICAS	INTELIGENCIA ARTIFICIAL	
	CONVENCIONAL	COMPUTACIONAL
BASES	Las soluciones deben ser elegantes, claras y probablemente correctas, e involucra métodos formales y lógicos.	La inteligencia es muy compleja para ser solucionada de manera formal, por lo tanto involucra métodos iterativos donde se desarrolla el conocimiento.
METODOS	<ul style="list-style-type: none"> • Razonamiento basado en casos. • Redes Bayesianas. • Sistemas Expertos. • IA basada en el comportamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redes Neuronales. • Sistemas difusos. • Computación evolutiva.
APLICACIONES	<ul style="list-style-type: none"> • Procesamiento de lenguaje natural. • Motores de búsqueda. • Diagnósticos médicos. • Detección de fraudes en tarjetas de crédito. • Análisis de mercado de acciones. • Reconocimiento del habla. • Reconocimiento de caracteres. • Movimiento de robots. 	<ul style="list-style-type: none"> • Programación de procesos en fábricas. • Robots para ambientes peligrosos. • Juegos de ajedrez. • Vehículos autónomos. • Sistemas cooperativos. • Sistemas de traducción de lenguaje natural.

A continuación se profundizará acerca de algunas de las subdivisiones de la inteligencia artificial que son más relevantes para el proyecto, debido a la naturaleza del proyecto y del avance tecnológico y en investigación en estas, las cuales son redes neuronales, sistemas difusos, redes bayesianas y sistemas expertos.

Ilustración 2. Diagrama Inteligencia Artificial



6 REDES NEURONALES

6.1 HISTORIA

La historia de las redes neuronales está muy conectada con la de la inteligencia artificial, ya que muchos de los pioneros de la inteligencia artificial, se enfocaron en el desarrollo de las redes neuronales. El nacimiento de las redes neuronales se dio cuando McCulloch y Pitts originó los modelos conexionistas definiendo formalmente la neurona (1943) como una máquina binaria con varias entradas y salidas. Luego Hebb, definió (1949) dos conceptos muy importantes y fundamentales que han pesado en el campo de las redes neuronales, basándose en investigaciones psicofisiológicas las cuales pueden basarse en estos postulados:

- El aprendizaje se localiza en las sinapsis (conexiones entre las neuronas).
- La información se representa en el cerebro mediante un conjunto de neuronas activas o inactivas.

Las hipótesis de Hebb, se sintetizan en la regla de aprendizaje de Hebb, que sigue siendo usada en los actuales modelos. Esta Regla nos dice que los cambios en los pesos de las sinapsis se basan en la interacción entre las neuronas pre y postsinápticas.

La primera conferencia sobre inteligencia artificial en la cual se discutió sobre la capacidad de las computadoras para simular el aprendizaje fue en 1956 (Darmouth). A partir de ahí, investigadores han desarrollado distintos modelos de redes neuronales que se citan a continuación:

- Widrow (1959)- Teoría sobre la adaptación neuronal y el Adaline (Adaptative Linear Neuron) y el Madaline (Multiple Adaline). Es la primera aplicación de las redes a problemas reales: filtros adaptativos para eliminar ecos en las líneas telefónicas.
- Rosenblatt (1962)- El Perceptrón es un identificador de patrones ópticos binarios, y salida binaria. Dio lugar a regla de aprendizaje delta, que permitía emplear señales continuas de entrada y salida.

- Minsky y Papert (1969)- Una seria crítica del Perceptrón que dada su naturaleza lineal tenía bastantes limitaciones, provocó una caída en picado de las investigaciones y una época gris para las redes neuronales.
- Anderson (1977)- Los Modelos de memorias asociativas. Investiga el autoasociador lineal brain-state-in-a-box
- Rumelhart, McClelland y Hinton (década del 80)- Crean el grupo PDP (Parallel Distributed Processing). Como resultado de los trabajos de este grupo salieron los manuales con más influencia desde el trabajo de Minsky y Papert.
- Hopfield (1982)- Elabora un modelo de red consistente en unidades de proceso interconectadas que alcanzan mínimos energéticos, aplicando los principios de estabilidad desarrollados por Grossberg.
- Kohonen (1984)- Mapas de Kohonen. Desarrolló redes basadas en aprendizaje competitivo, con una idea nueva basada en la biología: Las unidades de procesos físicamente adyacentes aprenderán a representar patrones de entrada similares, así las neuronas de salida adyacentes identifican patrones similares.
- Grossberg (1987)- El modelo ART (Adaptative Resonance Theory), estudia los principios de la estabilidad de redes neuronales.
- Hinton y Sejnowski (1986)- La máquina de Boltzmann, una red que usa la probabilidad para encontrar mínimos totales.
- Kosko (1987)- Los modelos BAM (Bi-directional Associative Memory.)

En la actualidad gracias a diversos grupos de investigación repartidos por universidades de todo el mundo, las redes neuronales han alcanzado una madurez muy aceptable y se usan en todo tipo de aplicaciones. (@REDES-NEURONALES, 2008)

6.2 DEFINICION

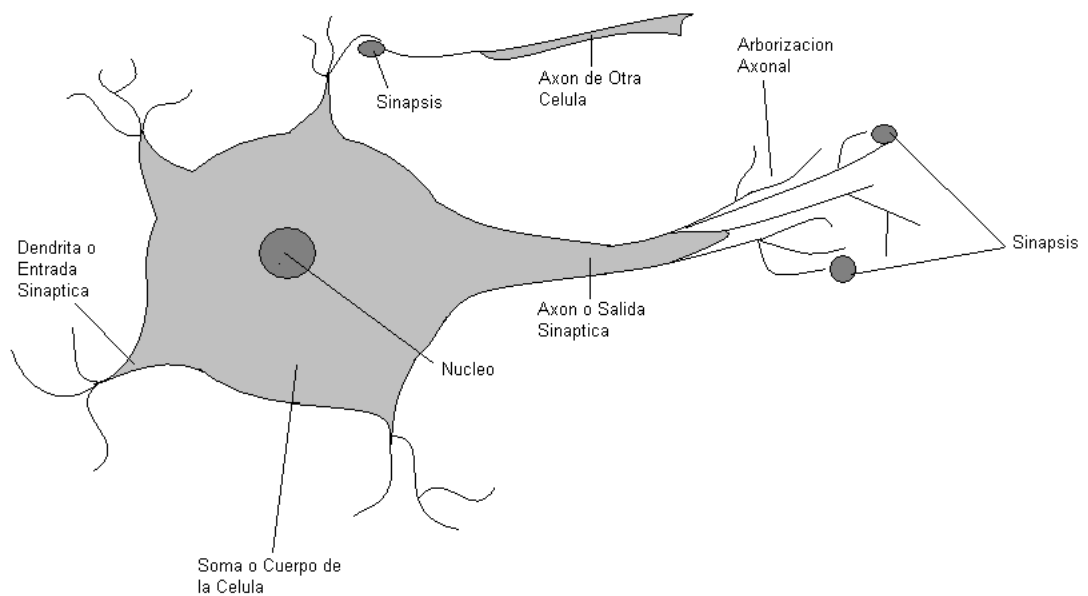
Las redes neuronales están compuestas de varios elementos simples operando en paralelo. Estos elementos están inspirados en sistemas nerviosos biológicos. La función de la red está determinada en gran proporción por las conexiones entre los elementos. Pueden ser entrenadas para desempeñar una función particular, ajustando los valores de las conexiones entre los elementos.

Estas, han sido entrenadas a través de los años para desempeñar funciones complejas en varios campos de aplicación incluyendo reconocimiento de patrones, identificación, clasificación, habla, visión, y sistemas de control. Las redes neuronales pueden ser entrenadas para resolver problemas que son difíciles para computadores convencionales o seres humanos (DEMUTH, BEALE, 1996, 1-1).

Las redes neuronales artificiales están compuestas por conjuntos de neuronas artificiales entrelazadas entre si operando en paralelo.

Las neuronas artificiales, se basan en modelos del las neuronas presentes en el cerebro humano, las cuales se explicaran a continuación. Véase Ilustración 3.

Ilustración 3. Modelo de una Neurona.



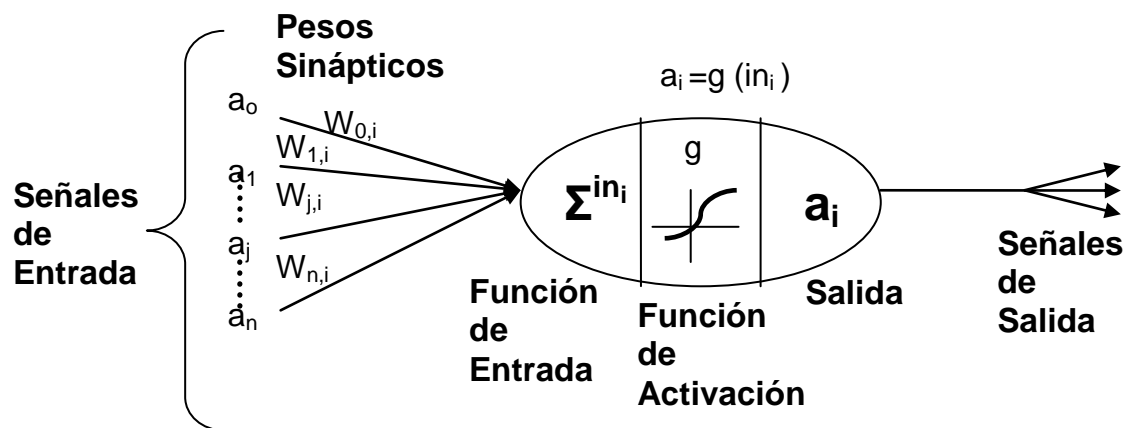
RUSELL, NORVIG, 2003, 11

Cada neurona consiste en un soma o cuerpo de la célula que contiene el núcleo. Saliendo de la célula existen una gran cantidad de fibras llamadas dendritas o entradas sinápticas en las cuales se realiza una reacción electroquímica con otras células y produce una entrada de información a la

neurona. La neurona tiene una sola fibra muy larga llamada axon o salida sináptica, la cual se arboriza y da lugar a varias sinapsis en las cuales se realiza una conexión con otras neuronas y entrega una información de salida de dicha neurona, la cual será información de entrada para otras células (RUSELL, NORVIG, 2003, 10).

Las redes neuronales artificiales, emulan el comportamiento de las neuronas del cerebro en simples funciones matemáticas que van desde la entrada de información, procesamiento de esta de acuerdo a su relevancia en el proceso y salida de nueva información. El modelo de una neurona artificial se puede observar en la Ilustración 4.

Ilustración 4. Modelo de una neurona artificial.



RUSELL, NORVIG, 2003, 737

Donde:

$a_0, a_1, \dots, a_j, \dots, a_n$ son las señales de entrada a la red neuronal.

$W_{0,i}, W_{1,i}, \dots, W_{j,i}, \dots, W_{n,i}$ son los pesos sinápticos de las entradas.

g es la función de activación de la neurona.

a_i es la señal de salida de la neurona.

Las redes neuronales están compuestas por nodos o unidades conectados por enlaces directos. Un enlace de la unidad j a la unidad i sirve para propagar la activación a_j , desde j hasta i . Cada enlace tiene un peso numérico $W_{j,i}$ asociado, el cual determina la fuerza y el signo de la conexión. Cada unidad i primero computa una suma ponderada de sus entradas véase Ecuación 1:

Ecuación 1. Suma ponderada de las entradas de la red neuronal

$$in_i = \sum_{j=0}^n W_{j,i} \cdot a_j$$

Luego se aplica la función de activación g a esta suma, para así obtener la salida véase Ecuación 2:

Ecuación 2. Ecuación para obtener la salida de la red neuronal

$$a_i = g(in_i) = g\left(\sum_{j=0}^n W_{j,i} \cdot a_j\right)$$

6.2.1 Funciones de Activación. La función de activación g es la encargada de definir la salida de una neurona en términos del nivel de activación de su entrada y debe cumplir dos requerimientos:

- La unidad i debe estar “activa” (tendiendo a +1) cuando se dan las entradas “correctas”, e “inactiva” (tendiendo a 0) cuando se dan las entradas “incorrectas”.
- La activación debe ser no-lineal, de otra manera, la red neuronal completa colapsaría en una función lineal simple. (RUSELL, NORVIG, 2003, 737)

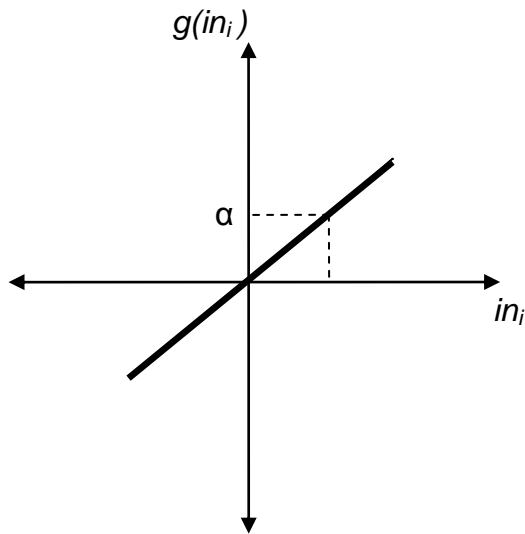
Existen miles de posibles funciones de activación g pero las más utilizadas se pueden resumir a cuatro:

6.2.1.1 Función de Activación Lineal. Basándose en los dos requerimientos de activación expuestos anteriormente, se observa que no es viable diseñar una red neuronal artificial con una función de activación lineal ya que esta colapsaría en una función lineal simple. Sin embargo se explicará este tipo de función de activación.

Esta función produce una salida lineal modulada de la entrada in_i descrita por la ecuación $g(in_i) = \alpha \cdot in_i$. Donde la entrada in_i fluctúa sobre los números reales y α es un valor real constante positivo que regula la amplitud de las entradas (BERNAL, GUTIERREZ, 1999, 29).

Gráficamente se puede ver cómo opera esta función en la Ilustración 5.

Ilustración 5. Función de Activación Lineal.



BERNAL, GUTIERREZ, 1999, 29

6.2.1.2 Función de Activación de Umbral de Paso. Esta función produce como salida únicamente dos valores predeterminados α y β (escalares positivos), respondiendo al signo de la entrada. Si la entrada a la función in_i iguala o excede un valor predefinido δ , entonces la función producirá el valor α , de otra forma, la función producirá el valor $-\beta$. Esta función se puede expresar matemáticamente como (BERNAL, GUTIERREZ, 1999, 30):

Ecuación 3. Función de activación de umbral de paso

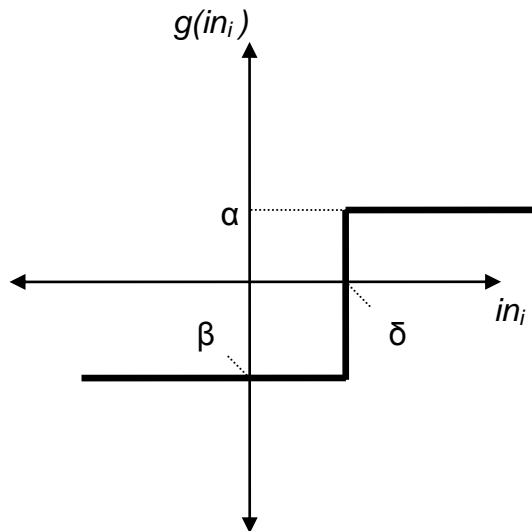
$$g(in_i) = \begin{cases} \alpha & \text{si } in_i \geq \delta \\ -\beta & \text{si } in_i < \delta \end{cases}$$

Gráficamente se puede ver cómo opera esta función en la Ilustración 6.

La función de umbral de paso descrita anteriormente es la función general, válida para cualquier par de escalares positivos α y β , pero típicamente en las redes neuronales se trabaja con valores binarios $\alpha=1$ y $\beta=0$, emitiendo +1 si la entrada es positiva y 0 si no lo es. Con las asignaciones $\alpha=1$, $\beta=0$ y $\delta=0$, la

función de umbral de paso se convierte en la función binaria expresada matemáticamente en la Ecuación 4.

Ilustración 6. Función de Activación de Umbral de Paso.



BERNAL, GUTIERREZ, 1999, 30

Ecuación 4. Función de activación de umbral de paso con valores binarios

$$g(in_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } in_i \geq 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Otra modificación muy común de esta función es cambiar el valor de $\beta=0$ por $\beta=-1$, de esta manera se obtiene la función de activación bipolar (BERNAL, GUTIERREZ, 1999, 30):

Ecuación 5. Función de activación de umbral de paso bipolar

$$g(in_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } in_i \geq 0 \\ -1 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

6.2.1.3 Función de Activación de Rampa No Lineal o Seudolineal. Esta función también conocida como función simétrica de saturación lineal, resulta de una combinación de la función de activación lineal y la función de activación de umbral de paso. Esta función define los límites inferior y superior en los valores que dicha función produce y permite una respuesta lineal entre los límites. Los valores límite, son conocidos como puntos de saturación. Esta función se puede expresar matemáticamente en su forma general de la siguiente forma:

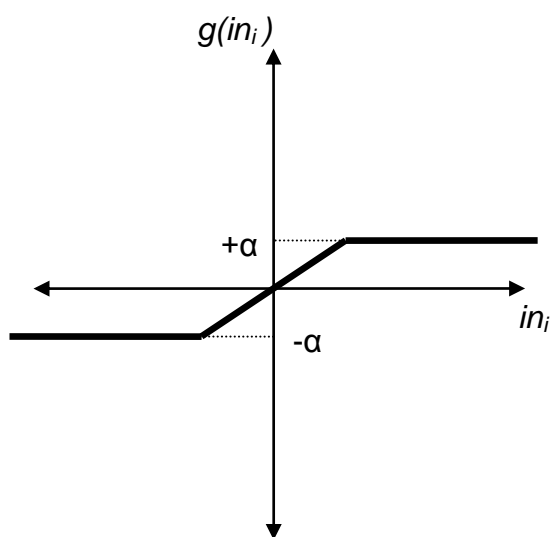
Ecuación 6. Función de activación de rampa no lineal

$$g(in_i) = \begin{cases} \alpha & \text{si } in_i \geq \alpha \\ in_i & \text{si } -\alpha < in_i < \alpha \\ -\alpha & \text{si } in_i \leq -\alpha \end{cases}$$

El valor α es el valor de saturación para la función y los puntos $in_i = \alpha$ y $in_i = -\alpha$ es aquellos puntos donde la función $g(in_i)$ tiene discontinuidades (BERNAL, GUTIERREZ, 1999, 31).

Gráficamente se puede ver cómo opera esta función en la Ilustración 7.

Ilustración 7. Función de Activación de Rampa No Lineal.



BERNAL, GUTIERREZ, 1999, 30

Al igual que la función de activación de umbral de paso, esta función es muy comúnmente utilizada en el diseño de redes neuronales con valores binarios. Matemáticamente esta función con estos valores binarios se puede expresar de la siguiente manera:

Ecuación 7. Función de activación de rampa no lineal con valores binarios

$$g(in_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } in_i \geq 1/2 \\ in_i & \text{si } -1/2 < in_i < 1/2 \\ 0 & \text{si } in_i \leq -1/2 \end{cases}$$

Esta función puede tener dos casos especiales en los cuales puede operar o como función de activación lineal o como función de activación de umbral de paso:

- Se puede volver una función de activación lineal si la región de operación se mantiene sin llegar a la saturación.
- Se puede volver una función de activación de umbral de paso si el factor de amplificación de la región lineal se hace infinitamente grande, lo cual causaría una región lineal acercándose a la vertical (HAYKIN, 1994,12).

6.2.1.4 Función de Activación de Umbral Sigmoidal. También es conocida como función de activación logística ya que es la más usada entre estas y es probablemente la más usada en la construcción de redes neuronales artificiales. Es una función similar a la función de activación de rampa no lineal, solo que hecha continua suavizando sus curvas por lo que se hace diferenciable (BERNAL, GUTIERREZ, 1999, 31) véase Ilustración 8. Esta función está representada matemáticamente de la siguiente manera:

Ecuación 8. Función de activación de umbral sigmoidal

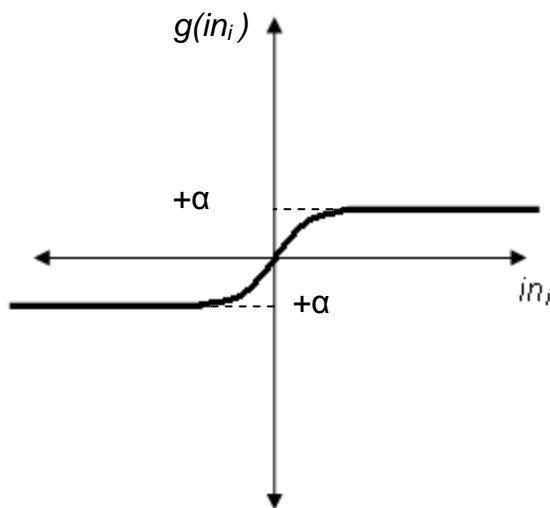
$$g(in_i) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha \cdot in_i}}$$

O utilizando la función de la tangente hiperbólica, se puede representar matemáticamente así:

Ecuación 9. Función de activación de umbral sigmoidal con tangente hiperbólica

$$g(in_i) = \tanh(in_i) = \frac{1 - e^{-\alpha \cdot in_i}}{1 + e^{-\alpha \cdot in_i}}$$

Ilustración 8. Función de Activación de Umbral Sigmoidal.



BERNAL, GUTIERREZ, 1999, 31.

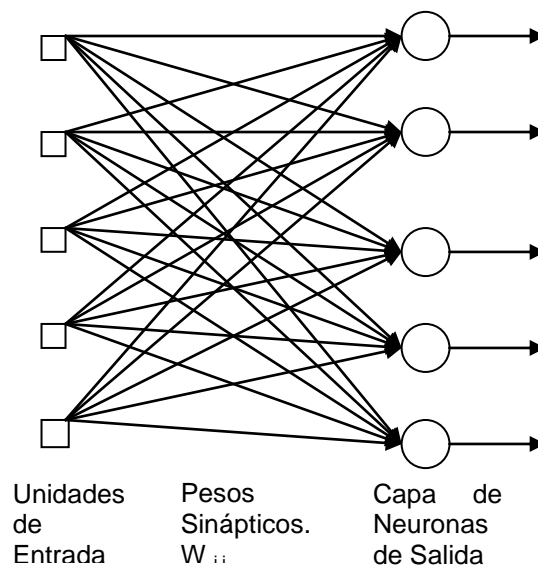
Donde $\alpha > 0$, usualmente se utiliza $\alpha = 1$, lo cual proporciona un valor de salida entre 0 y 1 (BERNAL, GUTIERREZ, 1999, 31-32).

6.2.2 Estructuras Neuronales. Se pueden clasificar principalmente de dos formas: hacia delante o acíclicas y cíclicas o recurrentes. Las redes hacia adelante pueden ser de una sola capa o multicapa. También existen estructuras de lattice o rejilla, pero no se profundizará en ellas ya que no son relevantes al proyecto. Cabe señalar que las estructuras hacia delante o feedforward son las más utilizadas actualmente.

6.2.2.1 Redes Neuronales Hacia Adelante de una Sola Capa. Una red con las entradas conectadas directamente a las salidas es llamada red neuronal hacia adelante de una sola capa, o red de perceptrón. Como cada unidad de salida es independiente de la otra, cada peso afecta solo una de las salidas (RUSELL, NORVIG, 2003, 737). Es aquella en la cual las neuronas o unidades están organizadas en forma de capas. En la forma más simple de red neuronal por capas, se tiene solo una capa de nodos de entrada, los cuales se proyectan en una capa de neuronas de salida (nodos de computación), pero no viceversa. Por eso se dice que este tipo de red es exclusivamente hacia adelante o “feedforward”. Este tipo de red se llama de capa única debido a que no se cuentan los nodos de entrada, ya que allí no se realiza ningún cómputo, solo se cuenta la capa de los nodos de salida o neuronas ya que allí es donde se realizan las computaciones. Los nodos de entrada, reciben señales del mundo exterior, las cuales son interpretadas y multiplicadas por su peso, para llegar a los nodos de salida, los cuales muestran su resultado al mundo exterior (HAYKIN, 1994, 18).

En la Ilustración 9 se puede observar una red neuronal hacia adelante de una sola capa con cinco nodos de entrada y cinco nodos de salida.

Ilustración 9. Red Neuronal Hacia Adelante de una Sola Capa.



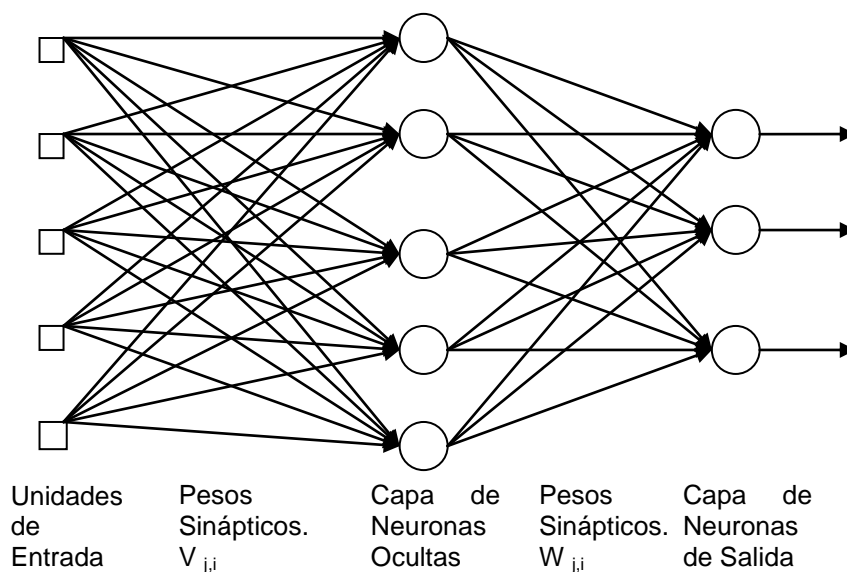
HAYKIN, 1994, 18

6.2.2.2 Redes Neuronales Hacia Adelante Multicapa. Es una red que tiene más de una capa de unidades, a diferencia de la red de una sola capa, en este tipo de red se realizan cálculos en más de una capa de neuronas. Este tipo de red tiene la capa de los nodos de entrada, en la cual no se realizan cálculos; tiene al menos una capa de unidades ocultas (se les dice ocultas debido a que no están en contacto con el mundo exterior) donde se realizan cálculos; y tiene una capa de unidades de salida, en la cual también se realizan cálculos y sus resultados son mostrados al mundo exterior. La función de la capa de unidades ocultas es intervenir entre las entradas externas, y las salidas de la red neuronal. Las señales de entrada del mundo exterior, son las entradas de la primera capa oculta, allí se realiza un cómputo y estas salidas se convierten en las señales de entrada de las segunda capa, cuyas salidas serán las entradas de la tercera capa y así sucesivamente dependiendo del número de capas que posea la red (HAYKIN, 1994, 19).

Las redes multicapa, pueden ser entrenadas para resolver problemas más complicados que las redes de una sola capa.

En la Ilustración 10 se muestra la estructura de una red hacia adelante multicapa con cinco nodos de entrada, cinco nodos ocultos y tres nodos de salida.

Ilustración 10. Red Neuronal Hacia Adelante Multicapa.



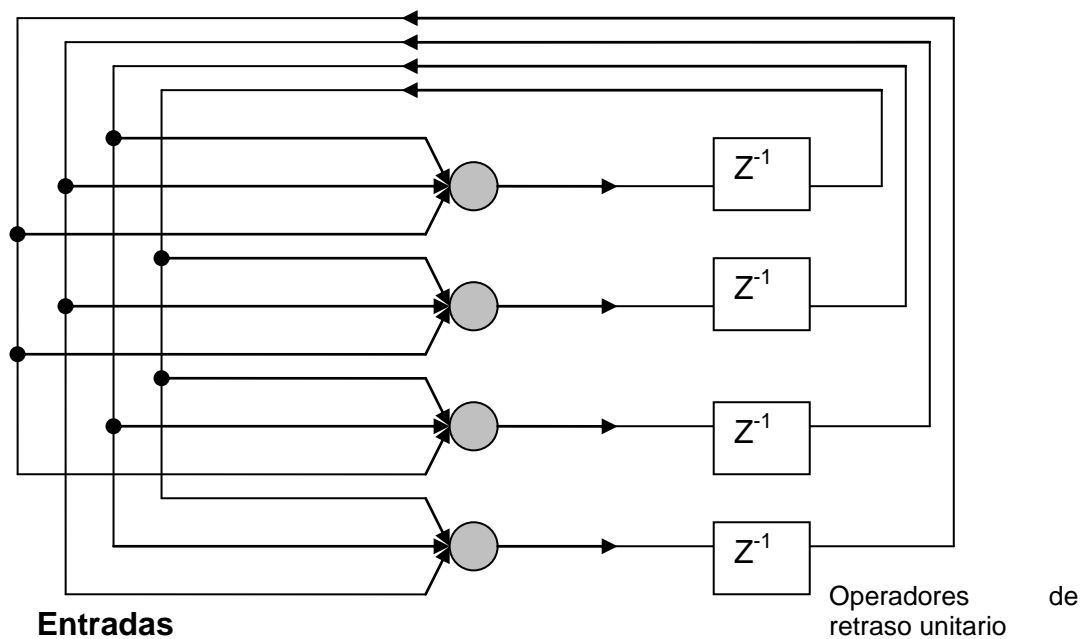
HAYKIN, 1994, 19.

6.2.2.3 Redes Neuronales Recurrentes. Las salidas de la red pueden alimentar nuevamente sus mismas entradas. Estas redes se distinguen de las redes hacia delante en que estas tienen al menos un lazo de retroalimentación, por lo tanto se consideran cíclicas, ya que la salida depende del estado inicial de la red, y el estado inicial, depende de la salida del ciclo anterior. Las redes recurrentes pueden tener lazos de autoretroalimentación, esto ocurre cuando una salida de una neurona, se conecta directamente a su entrada. Así como las redes por capas, las redes recurrentes pueden tener o no capas ocultas.

Al tener lazos de retroalimentación la red tiene la capacidad de tener memoria a corto plazo ya que se produce un sistema dinámico que puede alcanzar un estado estable, exhibir oscilaciones o hasta comportamiento caótico. Los lazos de retroalimentación involucran el uso de ramificaciones particulares compuestas de elementos de retardo unitario (denotados por Z^{-1}) (HAYKIN, 1994, 21).

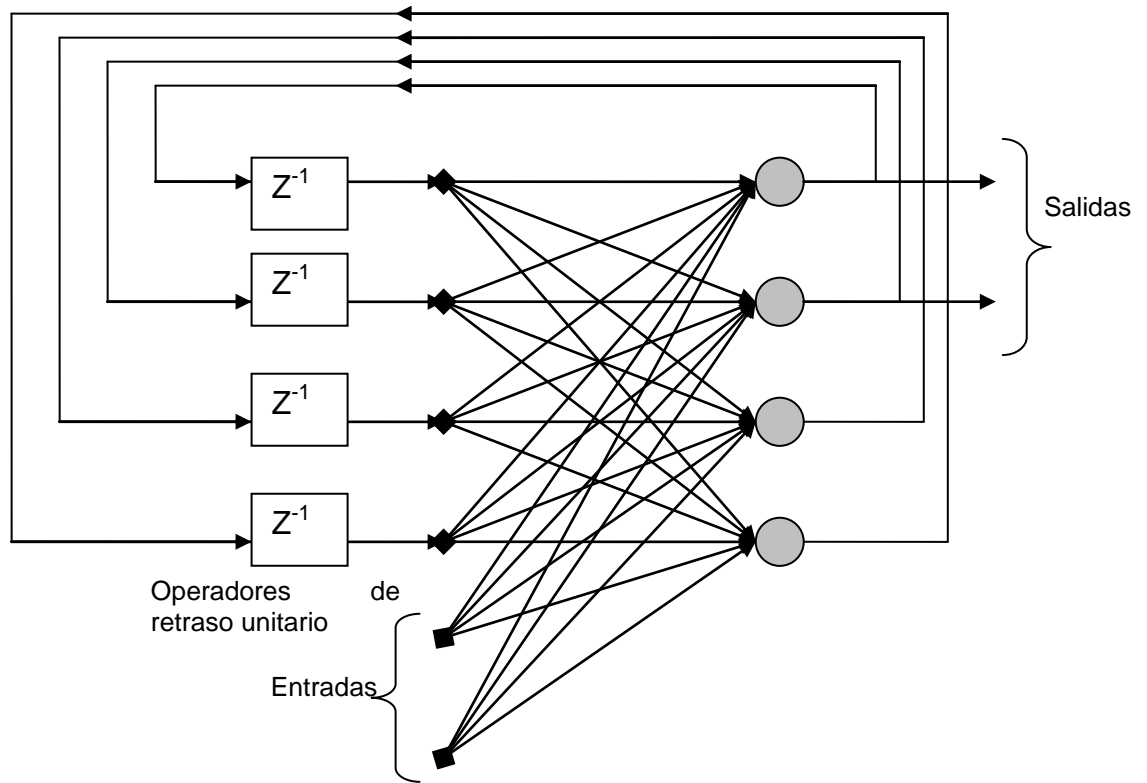
En la Ilustración 11 se ilustra un modelo de red neuronal recurrente sin autoretroalimentación ni capas ocultas y en la Ilustración 12 se ilustra un modelo con capas ocultas y autoretroalimentación.

Ilustración 11. Red Neuronal Recurrente Sin Autoretroalimentación ni Capas Ocultas.



HAYKIN, 1994, 21

Ilustración 12. Red Neuronal Recurrente Con Autoretroalimentacion y Capas Ocultas.



HAYKIN, 1994, 21

6.3 APLICACIONES

Las redes neuronales han sido aplicadas a un número en aumento de problemas en la vida real y de considerable complejidad, donde su mayor aplicación es la solución de problemas que son bastante complejos para la tecnología actual, tratándose de problemas que no tienen una solución algorítmica o cuya solución algorítmica es demasiado compleja para ser encontrada.

En general, debido a que son parecidas a las del cerebro humano, las redes neuronales son bien nombradas ya que son buenas para resolver problemas que el humano puede resolver pero las computadoras no. Estos problemas incluyen el reconocimiento de patrones y la predicción del tiempo. De cualquier forma, el humano tiene capacidad para el reconocimiento de patrones, pero la

capacidad de las redes neuronales no se ve afectada por la fatiga, condiciones de trabajo, estado emocional, y compensaciones.

Entre las aplicaciones más comunes de las redes neuronales, están:

- Reconocimiento de textos manuscritos.
- Reconocimiento del habla.
- Simulación de centrales de producción de energía.
- Detección de explosivos.
- Identificación de blancos de radares.
- Sistemas de control en reactores, procesos químicos físicos etc.
- Reconocimiento de patrones, voz y vídeo, Compresión de imágenes.
- Estudio y predicción de sucesos muy complejos (ej. La bolsa).
- Aplicaciones de apoyo a la medicina.
- Todo tipo de aplicaciones que necesiten el análisis de grandes cantidades de datos.

6.4 INSTITUTOS QUE TRABAJAN CON REDES NEURONALES

6.4.1 INSTITUTE FOR NEURAL COMPUTATION

El Instituto de Computación Neuronal (INC) es una unidad de investigación organizada de la Universidad de California en San Diego. Cuenta con 44 miembros en 14 disciplinas diferentes de investigación y está dedicado a la investigación y el desarrollo de una nueva generación de computadoras que trabajen paralelamente a través de un planteamiento coherente y un cohesionado plan de investigación que abarca las áreas de la neurociencia, la ciencia visual, ciencia cognitiva, la inteligencia artificial, matemáticas, economía y las ciencias sociales, ingeniería e informática.

El Instituto es el hogar de Neural Computation, una revista fundada por el Dr Terrence Sejnowski y publicada por la MIT Press, dedicada a informar sobre los últimos acontecimientos en estos campos. INC es un centro líder en el campo de la computación neuronal, iniciando proyectos conjuntos de investigación, proporcionando instalaciones especiales para llevar a cabo la investigación, la coordinación y la formación de jóvenes investigadores, y

ofreciendo actividades especiales a través de su programa de afiliados industriales.

Información Adicional:

Institute for Neural Computation

University of California, San Diego

9500 Gilman Drive DEPT 0523

La Jolla, California 92093-0523

Teléfono: (858) 534 - 8949

Fax: (858) 534 - 2014

Luisa Flores

e-mail: m2flores@ucsd.edu

<http://inc2.ucsd.edu>

6.4.2 NEURAL NETWORK RESEARCH GROUP

El UTCS Neural Networks Research Group fue fundado en 1992 por el profesor Risto Miikkulainen. El grupo forma parte del Laboratorio de Inteligencia Artificial en el Departamento de Ciencias de la Computación en la Universidad de Texas en Austin. La investigación se concentra en las ciencias cognitivas, neurociencia computacional, y computación evolutiva, incluyendo el procesamiento del lenguaje natural, la memoria episódica, concepto y esquema de aprendizaje, la corteza visual, y la evolución de redes neuronales en forma consecutiva decisión tareas tales como la robótica, juego, y la optimización de recursos.

Informacion Adicional:

E mail: risto@cs.utexas.edu

Telefono: (512) 471-9571; Fax: (512) 471-8885

Direccion Postal:

Department of Computer Sciences,

The University of Texas at Austin, 1 University Station C0500

Austin, TX 78712-0233 USA

<http://nn.cs.utexas.edu/>

7 SISTEMAS DIFUSOS

7.1 HISTORIA

El desarrollo de sistemas difusos comenzó en Estados Unidos más específicamente en la Universidad de California, Berkeley, en 1965 en una publicación del profesor Lotfi Zadeh. En los Estados Unidos, muchos estudiosos del tema se opusieron a su teoría y afirmaron que esta no tendría ningún futuro ni desarrollo científico aplicable. Hacia la década de los setenta, se comenzó a aplicar en Europa la teoría de sistemas difusos y se desarrollaron varias aplicaciones, lo que hacia la década de los ochenta, incentivo el desarrollo de estos sistemas en Japón. Los japoneses desarrollaron muchos tipos de sistemas de control basados en lógica difusa y se fundaron varios institutos de investigación de sistemas difusos. Al comienzo de la década de los noventa, Europa se percató de los grandes avances que habían hecho los japoneses en sistemas difusos y quisieron desarrollarlos para no perder este tipo de tecnología, lo que llamo la atención en los Estados Unidos los cuales también quisieron participar de este tipo de tecnología. Así fue como los sistemas difusos fueron inventados en Estados Unidos, desarrollados en Europa y masificados en Japón. Luego del gran avance logrado en Japón, se extendieron hacia Europa y retornaron a los Estados Unidos (VON ALTROCK, 1995, 3-7).

7.2 DEFINICION

Muchas disciplinas matemáticas como la teoría de la probabilidad, teoría de la información, y teoría de arreglos difusos, tratan la descripción de la incertidumbre. Los sistemas difusos se basan en la incertidumbre, por ello es muy importante clasificarla según el tipo. Se usan básicamente dos tipos de incertidumbre: estocástica y léxica.

7.2.1 Incertidumbre Estocástica. Trata la incertidumbre o probabilidad acerca de la ocurrencia de cierto evento. Por ejemplo “la probabilidad de dar en el blanco es de 0.8”. El evento está bien definido, entonces la incertidumbre está en que el blanco sea alcanzado o no. La incertidumbre esta cuantificada por un grado de probabilidad (0.8 para el ejemplo). Afirmaciones que contengan incertidumbre estocástica, pueden ser procesadas y combinadas con otras, utilizando métodos estocásticos como teorema de Bayes (VON ALTROCK, 1995, 7).

7.2.2 Incertidumbre Léxica

Muy ligada al comportamiento humano y su lenguaje como forma de comunicación. Este tipo de incertidumbre trata con la imprecisión que esta inherente en muchas de las palabras que los humanos utilizan para evaluar conceptos y desarrollar conclusiones. Por ejemplo: adjetivos modificativos del sustantivo como hombre “alto”, días “calientes” etc. no tienen un significado específico, ya que es relativo a la persona que tenga la apreciación. Un niño tiene un concepto diferente de un hombre “alto” al que tiene un adulto. El contexto y el ambiente también juegan un papel muy importante en la apreciación que una persona puede tener sobre otra para considerarla “alta” o no. No existe una definición exacta para considerar una persona “alta” o no. No existe una ley que determine un umbral por encima del cual una persona se considere “alta” o no. Si existiera, esta ley no tendría sentido ya que por ejemplo si una ley dice que una persona es alta si mide más de 1.80 mt, entonces implicaría que si una persona mide 1.79 mt no es para nada alta.

La ciencia que trata con la manera en que los humanos evalúan conceptos y toman decisiones, es la psicolingüística. Esta probado que los humanos utilizan palabras como categorías subjetivas para clasificar figuras como “altura”, “temperatura” etc. Utilizando estas categorías subjetivas, los temas en el mundo real son evaluados según el grado en que satisfacen el criterio.

Aunque muchos de los conceptos utilizados no están definidos precisamente, los humanos pueden usarlos para evaluaciones complejas y decisiones que están basadas en diferentes factores. Utilizando abstracción y pensando en analogías unas pocas sentencias, pueden describir contextos complejos que

serían muy difícil de modelar con precisión matemática. Por ejemplo considere la siguiente oración: “Nosotros probablemente tendremos un exitoso año financiero”. En una primera mirada, esta oración es muy parecida a la del ejemplo de incertidumbre estocástica, en el contexto de que las dos expresan incertidumbre. En esta última, el evento como tal no está bien definido, ya que para algunas compañías, un año exitoso puede significar que superar la bancarrota, para otras puede significar superar las ganancias del año anterior o superar un valor de utilidades previamente establecido. Por lo tanto el concepto de “año financiero exitoso” es una categoría subjetiva.

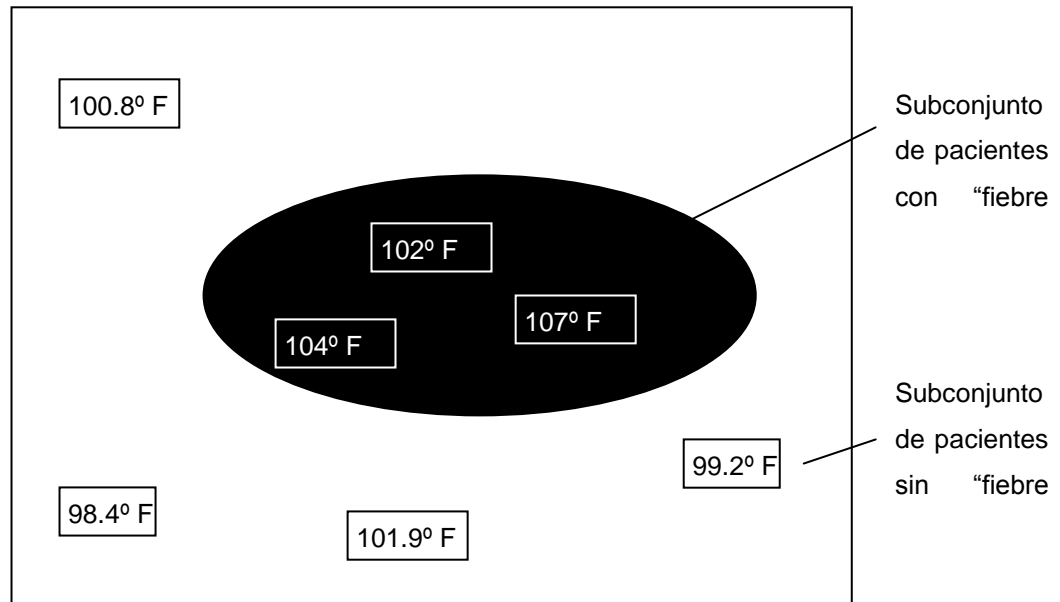
Una diferencia fundamental entre incertidumbre estocástica y léxica, es la forma en que la probabilidad está siendo expresada, mientras que en la estocástica, la probabilidad se expresa matemáticamente, en la léxica, la probabilidad no se cuantifica (VON ALTROCK, 1995, 8-9).

7.2.3 Lógica Difusa

Ha sido desarrollada como un modelo matemático para representar el proceso de decisión y evaluación de los humanos de una manera algorítmica (VON ALTROCK, 10, 1995).

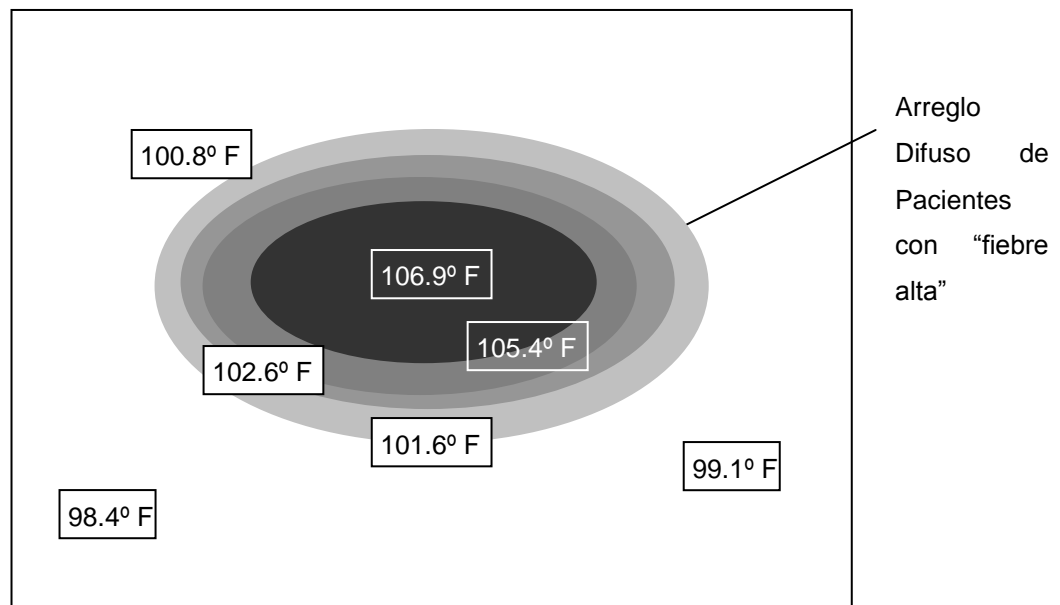
En un arreglo difuso, se comparan valores extremos (máximos y mínimos) para de esta manera determinar en qué punto está el valor que se tiene. Por ejemplo se asume que un paciente tiene fiebre alta si su temperatura corporal supera los 102° F pero esto no quiere decir que si un paciente tiene una temperatura de 101.9° F no sufre de fiebre. En un arreglo convencional la fiebre alta estaría descrita exactamente por encima del valor de 102° F (véase Ilustración 13) pero en un arreglo difuso, también se pueden contener valores que puedan pertenecer más o menos al subconjunto. (Véase Ilustración 14)

Ilustración 13. Arreglo Convencional para un Conjunto de Temperaturas Corporales



VON ALTROCK, 1995, 12.

Ilustración 14. Arreglo Difuso de Pacientes con "Fiebre Alta"



VON ALTROCK, 1995, 12.

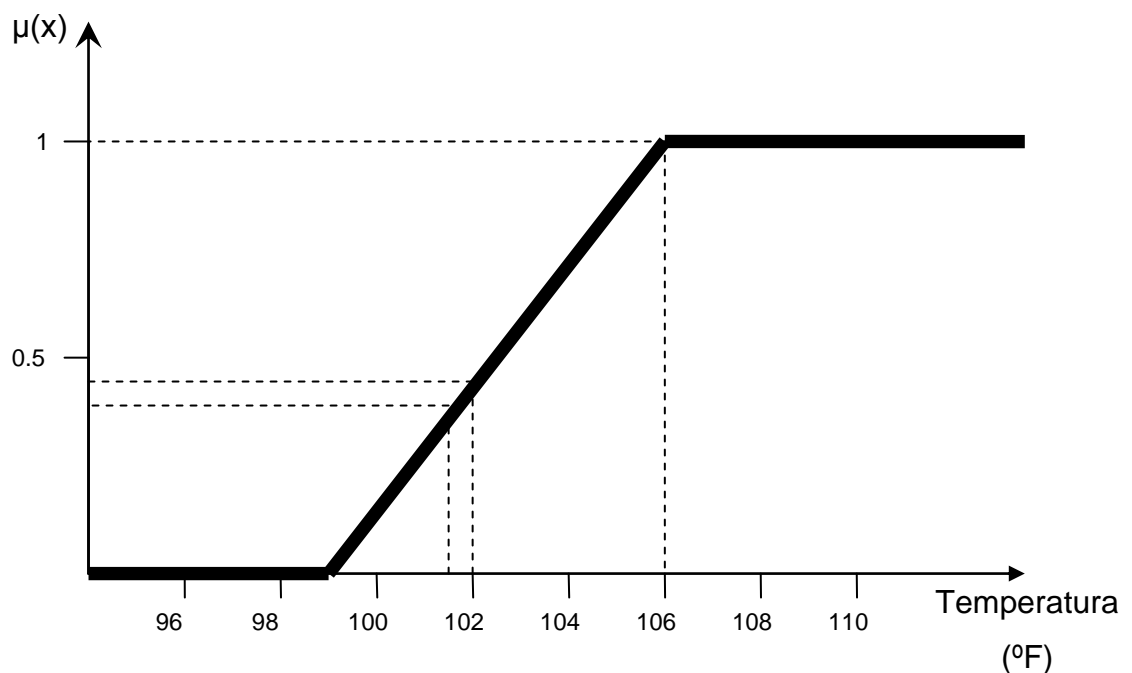
En la Ilustración 13 se ilustra un arreglo convencional en el cual los valores pueden estrictamente pertenecer o no al subconjunto de "fiebre alta", mientras

que en la Ilustración 14 se ilustra un subconjunto difuso en el cual los valores pueden pertenecer “más o menos” al subconjunto. La escala de grises indica el grado en el cual la temperatura corporal pertenece al subconjunto de “fiebre alta”.

Este grado se conoce como “grado de pertenencia”, e indica que tan ligado esta al grupo. Estos valores van desde 0 hasta 1. En el ejemplo anterior, la temperatura de 94° F no pertenecería para nada al subconjunto, mientras que una temperatura de 110° F pertenecería totalmente al grupo de “fiebre alta”.

El grado de pertenencia puede ser representado por una función continua. En la Ilustración 15 se ilustra una función continua que representa el caso de fiebre alta.

Ilustración 15. Función Continua Del Caso de Fiebre Alta.



VON ALTROCK, 1995, 13.

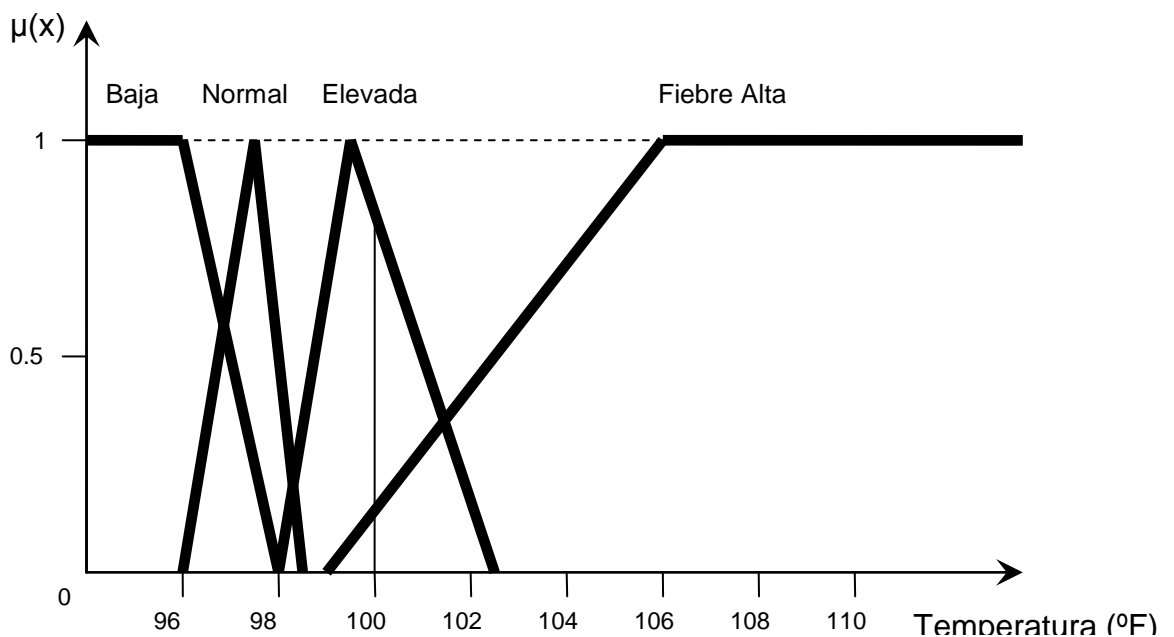
En esta función se representa en el eje x la temperatura de los pacientes, mientras que en el eje y se representa el grado de pertenencia al subconjunto de fiebre alta.

A continuación se presentaran algunos grados aproximados de pertenencia al subconjunto de fiebre alta.

$\mu(94^{\circ}\text{F})=0$	$\mu(100^{\circ}\text{F})=0.1$	$\mu(106^{\circ}\text{F})=1$
$\mu(96^{\circ}\text{F})=0$	$\mu(102^{\circ}\text{F})=0.35$	$\mu(108^{\circ}\text{F})=1$
$\mu(98^{\circ}\text{F})=0$	$\mu(104^{\circ}\text{F})=0.65$	$\mu(110^{\circ}\text{F})=1$

En los arreglos borrosos se pueden hacer combinaciones de múltiples categorías subjetivas describiendo el mismo contexto. Por ejemplo para el caso de la fiebre alta, también se pueden describir de manera gráfica, los valores para temperatura baja, normal, elevada y fiebre alta (véase Ilustración 16).

Ilustración 16. Función Continua Del Caso de Fiebre Para Varias Temperaturas y Clasificaciones.



VON ALTROCK, 1995, 14.

Así por ejemplo una temperatura de 100° F podría tener dos valores diferentes según su grado de pertenencia. Para el subconjunto de fiebre elevada $\mu(100^{\circ}\text{F})=0.8$ mientras que para el subconjunto de fiebre alta $\mu(100^{\circ}\text{F})=0.15$.

En los sistemas difusos, no es posible aplicar los operadores boléanos, ya que un valor no puede ser mas o menos verdadero, por lo tanto fue necesario definir nuevos operadores que representen el AND, OR y NOT (VON ALTROCK, 1995, 23).

AND: $\mu_{A \wedge B} = \min \{ \mu_A, \mu_B \}$

OR: $\mu_{A \vee B} = \max \{ \mu_A, \mu_B \}$

NOT: $\mu_{\neg A} = 1 - \mu_A$

La lógica difusa, utiliza la regla If-Then (Si-Entonces), y esta computación consiste en dos componentes:

Agregación: Computación de la parte "If" de la regla.

Composición: Computación de la parte "Then" de la regla.

A partir de aquí se pueden desarrollar sentencias para crear una regla completa que modele un problema en lógica difusa (VON ALTROCK, 1995, 22-23).

7.3 APLICACIONES

La lógica difusa se utiliza cuando la complejidad del proceso en cuestión es muy alta y no existen modelos matemáticos precisos, para procesos altamente no lineales y cuando se envuelven definiciones y conocimiento no estrictamente definido (impreciso o subjetivo).

En cambio, no es una buena idea usarla cuando algún modelo matemático ya soluciona eficientemente el problema, cuando los problemas son lineales o cuando no tienen solución.

A continuación se citan algunos ejemplos de su aplicación:

- Sistemas de control de acondicionadores de aire.
- Sistemas de foco automático en cámaras fotográficas.
- Electrodomésticos familiares (Frigoríficos, lavadoras...)
- Optimización de sistemas de control industriales
- Sistemas de reconocimiento de escritura
- Mejora en la eficiencia del uso de combustible en motores
- Sistemas expertos del conocimiento (simular el comportamiento de un experto humano)
- Tecnología informática
- Bases de datos difusas: Almacenar y consultar información imprecisa.

Para este punto, por ejemplo, existe el lenguaje FSQL.

- En sistemas de control que no dependen de un Sí/No. (WIKI2 @ 2008)

En el Anexo 4 de la sección 18.4 se muestra un ejemplo de sistema de diagnóstico desarrollado aplicando sistemas difusos. Este sistema fue desarrollado como proyecto de maestría en el Grupo de Estudios en Mantenimiento Industrial – GEMI de la universidad EAFIT. Se presenta debido a que el desarrollo está enfocado al objeto de estudio planteado en el presente proyecto, el cual será expuesto en el numeral 13.1.

7.4 INSTITUTOS QUE TRABAJAN CON SISTEMAS DIFUSOS

7.4.1 FUZZY SYSTEMS RESEARCH GROUP. Grupo de investigación conjunto de Rhodes University y University of Fort Hare en Sudafrica, cuyo enfoque es el de desarrollo de sistemas difusos con profesores pioneros en la materia.

Este grupo se centra en la investigación de matemáticas difusas y sus aplicaciones a la teoría de sistemas, ya sean sistemas de información, sistemas médicos, sistemas operativos o sistemas que se plantean en los ámbitos social, económico, científico o administrativo. Cabe destacar que este grupo no se limita al estudio de conjuntos y sistemas difusos, sino que alienta la investigación en áreas afines. La estrategia del grupo se articula en torno a cuatro grandes principios: la complementariedad, la coherencia, la sinergia y la eficacia.

Información Adicional:

<http://www.ru.ac.za/affiliates/fuzzysystems/index.php>

Prof V. Murali (Rhodes University)

E-mail: v.murali@ru.ac.za

Prof. B.B. Makamba (University of Fort Hare)

E-mail: BMakamba@ufh.ac.za

Dr. G. Lubczonok (Rhodes University)

E-mail: g.lubczonok@ru.ac.za

Dr. C.C. Remsing (Rhodes University)

E-mail: c.remsing@ru.ac.za

Mr Z.Mahlasela (University of Fort Hare)

E-mail: ZMahlasela@ufh.ac.za

7.4.2 THE FUZZY SYSTEMS RESEARCH GROUP. Grupo de investigación en sistemas difusos establecido en el Centre For Computational Intelligence en la University of Essex, UK.

El Fuzzy Systems Research Group se dedica a hacer una importante contribución a los fundamentos teóricos y aplicaciones en el mundo real de sistemas difusos. El grupo es un reconocido líder internacional en las áreas de sistemas de control basados en lógica difusa y sistemas difusos híbridos.

Informacion Adicional

<http://cic.essex.ac.uk/fuzzy/>

The Computational Intelligence Centre,
Fuzzy Systems Research Group,
University of Essex,
Wivenhoe Park, Colchester CO4 3SQ,
United Kingdom.

Telefono: +44 1206 873601

Fax: +44 1207 872788

Email: hani@essex.ac.uk

8 REDES BAYESIANAS

8.1 HISTORIA

Es muy reciente, ya que esta surge como teoría en la década de 1980. Desde este tiempo, se ha ido intensificando la investigación acerca de las redes bayesianas como herramienta para ayuda a la toma de decisiones basado en probabilidades.

Los fundamentos de las redes bayesianas vienen de más atrás ya que en 1913 John Henry Wigmore utilizó un tipo de variante de estas redes para analizar evidencia de juicio. Pocos años más tarde, en la década de 1920 el biólogo Sewall Wright combinó gráficas dirigidas y modelos de regresión lineal para inventar los análisis de ruta crítica. Estos modelos fueron estudiados más a fondo por Herbert Simon y Hubbert Blalock.

Basándose en las teorías de Markov (cadenas de Markov) y Bayes (teorema de Bayes), los investigadores fueron desarrollando teorías hasta llegar a implementarlas en lo que hoy se conoce como las redes bayesianas.

En la década de 1990, las redes bayesianas atrajeron mucha atención como una estructura para construir sistemas normativas, no solo en institutos de investigación, sino también en la industria.

8.2 DEFINICION

Modelo gráfico probabilístico que representa un arreglo de variables y sus independencias probabilísticas. Refleja los estados de una parte del mundo que está siendo modelada y que describe como esos estados están relacionados a través de probabilidades condicionales. Todos los posibles estados del modelo representan todos los posibles mundos que pueden existir, es decir, todas las posibles formas en que las partes o estados pueden ser configurados. En un sistema causal, algunos estados tienden a ocurrir más frecuentemente cuando otros estados están presentes (si está nublado, las probabilidades de llover son más altas).

Las redes bayesianas están demostrando ser muy útiles porque son adaptables. Es posible comenzar con un conocimiento limitado acerca del dominio, y aumentarlo a la medida que se sepa más.

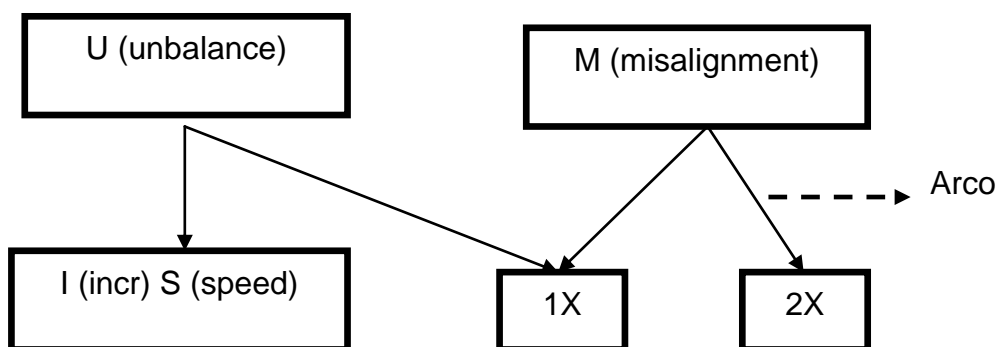
8.2.1 Aspectos Básicos de las Redes Bayesianas. Muchas tareas prácticas se reducen al problema de clasificación. Los diagnósticos de fallos son uno de estos ejemplos. Una red bayesiana ayuda a abordar el problema de clasificación de manera que soluciona problemas que otros métodos solucionan parcialmente:

- Capacidad de mezclar conocimiento a priori con datos o conocimiento experimental.
- Capacidades explicativas.
- Tratamiento de la incertidumbre – tratamiento de la causalidad.
- Aprendizaje en asuntos estructurales y paramétricos.

Las redes bayesianas son una combinación de dos áreas matemáticas diferentes: teoría de grafos y teoría de la probabilidad. Se pueden definir como la representación de una distribución de probabilidad conjunta definida sobre un conjunto finito de variables aleatorias, que puede ser discreto o continuo.

La representación es un grafo dirigido acíclico que se compone de nodos, que representan variables aleatorias, y arcos, que representan dependencias entre las variables. Hay una distribución de probabilidad condicional asociada a cada nodo que describe la dependencia entre el nodo y sus padres. La Ilustración 17 muestra un ejemplo de red bayesiana.

Ilustración 17. Representación gráfica de un modelo de probabilidad simple.



Aquí se puede observar un grafo dirigido aciclico donde cada arco está dirigido y no hay ciclos. Contiene cinco nodos (variables aleatorias discretas) que corresponden a diferentes estados que pueden ocurrir en el sistema: Unbalance (U) (desbalanceo), Misalignment (M) (desalineamiento), Increase Speed (IS) (incremento de amplitud de vibraciones cuando incrementa la velocidad), picos de amplitud altos en la frecuencia fundamental (1X) y picos de amplitud altos en 2ª armónica (2X). Esta representación grafica sirve para representar las suposiciones dependientes e independientes, que encamina a desarrollar una distribución de probabilidad conjunta. Por ejemplo, se puede decir que 2X es condicionalmente dependiente de M, pero es condicionalmente independiente de U dado M.

Es decir, $P(2X | U, M) = P(2X | M)$

Se puede decir también que 1X y 2X son condicionalmente independientes bajo un fallo de eje dado.

Es decir, $P(1X | M, 2X) = P(1X | M)$

Dicho esto, se puede ver que la distribución de probabilidad conjunta es, en este caso, reducida por factorización a los términos incluidos en:

$$P(U, M, IS, 1X, 2X) = P(U) * P(M) * P(1X | U, M) * P(2X | M) * P(IS | U) =$$

$$P(+U) * P(+M) * P(+1X | +U, +M) * P(+2X | +M) * P(+IS | +U) + P(+U) * P(+M) * P(+1X | +U, +M) * P(+2X | +M) * P(+IS | -U) + P(+U) * P(+M) * P(+1X | +U, +M) * P(+2X | +M) * P(-IS | +U) + \dots + P(-U) * P(-M) * P(-1X | -U, -M) * P(-2X | -M) * P(-IS | -U)$$

8.2.2 Redes Bayesianas Como Sistemas Expertos Probabilísticos. Por la teoría de la probabilidad, se conoce que se pueden inferir muchas probabilidades $P(2X | M) = P(M) * P(M | 2X) / P(2X)$ mediante el uso del teorema de Bayes y las probabilidades condicionales. Esto se usa para inferir la probabilidad de desalineamiento (M) tomando como evidencia la aparición de un pico de amplitud en la 2ª armónica (2X), pero también puede trabajar en la dirección opuesta, haciéndolo útil, por ejemplo, para reforzar otras causas (como desbalanceo) si ya se sabe que no hay desalineamiento en el sistema.

Mediante los mecanismos de inferencia apropiados, el tratamiento de las distribuciones condicionales parciales permite el cálculo de probabilidades de cualquier nodo en la red dada una evidencia.

Las descripciones de arriba de probabilidades condicionales y distribuciones de probabilidad, se usaron mucho antes de que surgieran las redes bayesianas. Por Ejemplo, Prospector fue uno de los primeros sistemas expertos en usar teorema de Bayes para el tratamiento de la incertidumbre. Sin embargo, los enfoques probabilísticos fueron, en principio difíciles de seguir debido a la dificultad de representar/definir la distribución de probabilidad conjuntas de diversas variables.

La solución vino una década después a través del desarrollo de modelos gráficos probabilísticos, cuyos dos principales exponentes fueron los modelos de Markov ocultos y los modelos Bayesianos, y cuya principal característica fue la asociación de modelos gráficos con factores de probabilidad condicional y la inclusión de algoritmos apropiados para manejar estas distribuciones. Haciendo esto, las redes Bayesianas desarrollaron un proceso de inferencia- inferencia probabilística- que puede ser comparada a la de los sistemas expertos:

- La base de conocimientos está compuesta de hechos en ambos casos, pero en lugar de reglas, los sistemas expertos probabilísticos incluyen distribuciones de probabilidad condicional.
- El motor de inferencia se dirige ahora mediante la teoría de la probabilidad que activa las probabilidades condicionales mediante diferentes algoritmos que normalmente aportan inferencias apropiadas.

El modelado de redes bayesianas se ajusta completamente a las nuevas tendencias existentes en la ingeniería del conocimiento: el cambio de la adquisición del conocimiento a modelado del conocimiento. Las redes bayesianas y las metodologías de modelado del conocimiento comparten la necesidad de una representación del conocimiento adecuada a través del modelado del problema dentro de las plantillas disponible. En ambos casos, los sistemas basados en conocimiento se pueden ver como antecedentes. Con respecto a esto, las redes bayesianas se pueden ver como sistemas de

representación del conocimiento especiales que se ajustan a la representación de semánticas causales (Arnaiz et al, 2005, 39-46).

8.3 APLICACIONES

Las redes bayesianas han sido desarrolladas en la industria mayormente en la última veintena y han sido aplicados en un gran número de campos que se describirán a continuación:

En el campo académico se han desarrollado sistemas inteligentes de ayuda a la tutoría en campos como la física. En la biología se han desarrollado técnicas de aprendizaje de relaciones causales genéticas y métodos de reconstrucción de arboles filogenéticos. En los negocios y las finanzas se modeló y predijo el comportamiento de clientes en una gran variedad de configuraciones de negocios. Otro desarrollo en el campo de las finanzas fue la segmentación de los clientes bancarios. En juegos computacionales se han desarrollado simulaciones de la evolución del mundo. En el campo del hardware computacional se han desarrollado sistemas para el diagnóstico de fallos en procesadores. Las redes bayesianas también se han aplicado en el desarrollo de sistemas de soporte al diagnóstico. En el campo de la medicina se han hecho grandes adelantos utilizando redes bayesianas en el diagnóstico de traumas, desórdenes del sueño, dermatología, patologías etc. En el procesamiento de lenguaje natural se han utilizado para representar contenido semántico, relacionar palabras utilizadas para expresar conceptos, inferir palabras omitidas en oraciones debido a errores, etc. En la planeación se han aplicado redes bayesianas dinámicas para la planeación y control bajo condiciones de incertidumbre. En la psicología se han desarrollado aplicaciones para la rama de la psicología cognitiva. Para análisis de confiabilidad se han desarrollado sistemas para el análisis en plantas generadoras de potencia, vehículos militares etc. También se han desarrollado aplicaciones para el reconocimiento de voz y control vehicular.

8.4 INSTITUTOS QUE TRABAJAN CON REDES BAYESIANAS

8.4.1 DAGS. Es el grupo de investigación de la profesora Daphne Koller cuyo principal objetivo es la investigación sobre el control de dominios complejos que implican grandes cantidades de incertidumbre. Su trabajo se basa en el marco de la teoría de la probabilidad, teoría de decisión y la teoría de juegos, pero utiliza técnicas de inteligencia artificial e informática que permita aplicar este marco a complejos problemas del mundo real.

La mayor parte de su trabajo se basa en el uso de modelos gráficos probabilísticos como las redes bayesianas, diagramas de influencia de Markov y procesos de toma de decisiones. Dentro de ese tema su trabajo se ve representado en muchas áreas como la representación, inferencia y aprendizaje, así como la toma de decisiones. Uno de sus objetivos principales ha sido la ampliación del poder de representación del lenguaje del modelo probabilístico gráfico para abarcar un mayor dominio de problemas del mundo real.

Información Adicional:

Professor Daphne Koller

Room 142, Gates Building 1A

Computer Science Department

Stanford University

Stanford, CA 94305-9010

Telefono: (650) 723-6598

Fax: (650) 725-1449

E mail: koller@CS.Stanford.EDU

<http://dags.stanford.edu/>

9 SISTEMAS EXPERTOS

9.1 HISTORIA

La evolución histórica de los sistemas expertos ha sido clasificada en cuatro etapas, las cuales se describirán a continuación.

9.1.1 Etapa de Invención. Comprendida entre los años de 1965 y 1970, años entre los cuales se desarrollaron los sistemas que hoy se consideran precursores como el DENDRAL de la Universidad de Stanford iniciado en 1965, o el MACSYMA, el cual es un sistema experto en matemáticas desarrollado en el MIT.

9.1.2 Etapa de Prototipos. Comprendida entre 1970 y 1977, fue en ella donde se desarrollaron los primeros prototipos de sistemas expertos, los cuales son muy conocidos en el medio. Por ejemplo en la Universidad de Pittsburg se desarrollo el sistema INTERNIST para el diagnostico medico. Luego en 1973 se desarrolla el MYCIN el cual es un sistema experto para diagnostico y tratamiento en oftalmología y de allí surge el primer Shell (o armazón) llamado EMYCIN.

9.1.3 Etapa de Experimentación. Comprendida entre 1977 y 1981. En esta etapa, las ideas obtenidas sobre la representación del conocimiento como reglas en los prototipos, se van asentando y allí aparecen los llamados “Shells” o “Sistemas Esenciales”, lo que permite que se desarrollen rápidamente otros Sistemas Expertos. En 1977 se desarrolla el OPS el cual es un Shell de un sistema experto. Un Shell es el resultado de “vaciar” o eliminar el conocimiento de la base de datos y conservar todos los demás módulos. De esta manera este Shell se convierte en una herramienta para construir sistemas expertos en otras áreas y con otros conocimientos. De allí que utilizando los shells de un sistema experto, se de paso a la creación de otros, por ejemplo del sistema PROSPECTOR, se derivo KAS (Knowledge Aquisition System).

9.1.4 Etapa de Industrialización. Comienza en 1981 ya que es en este año donde se fundan la primera empresa especializada en el desarrollo de sistemas expertos, TEKNOLEDGE. Y es a partir de allí que empresas tecnológicas como Xerox, Texas y otras, se interesen por la inteligencia artificial e IBM la cual había perdido el interés por la inteligencia artificial, retome el interés en esta y comercializa su producto INTELLEC. Es en el año de 1982 cuando se empieza el proyecto japonés de quinta generación para desarrollar computadores inteligentes (LONDOÑO, 1988, 5-7).

9.2 DEFINICION

A continuación se mostrarán algunas definiciones de sistemas expertos:

- Sistemas de computación que utilizan un conocimiento específico para resolver problemas que solo pueden ser resueltos por expertos (LONDOÑO, 1988, 5).
- Programa computacional que representa y razona con conocimientos de algún especialista en un tema específico, con el fin de resolver problemas o dar consejos (JACKSON, 1990, 3).
- Sistema que cumple completamente una función que normalmente requeriría experiencia humana, o puede cumplir el papel de asistente a la toma de decisiones (JACKSON, 1990, 3).

9.3 CARACTERISTICAS

- Un sistema experto simula el razonamiento humano acerca de un problema de dominio de un experto, en lugar de simular el mismo el dominio. Esto distingue los sistemas expertos de otros programas más familiares que incluyen modelación matemática. Lo que no quiere decir que el programa es un fiel modelo psicológico del experto, simplemente es que la atención se fija a la emulación de la capacidad de resolución de problemas de un experto; es decir, la realización de las tareas pertinentes, tal como, o mejor que el experto.

- Un sistema experto realiza razonamiento más que representaciones de los conocimientos humanos, además de realizar cálculos numéricos o recuperación de datos. El conocimiento en el programa normalmente se expresa en algún lenguaje con fines específicos y esta separado del código que lleva a cabo el razonamiento. Estos distintos módulos del programa se conocen como la base de conocimientos y el motor de inferencia, respectivamente.
- Los sistemas expertos resuelven los problemas por métodos heurísticos o aproximados, que a diferencia de las soluciones algorítmicas, no tienen el éxito garantizado. La heurística¹ es esencialmente una regla de oro que codifica una porción de conocimientos sobre la manera de resolver los problemas en algún dominio. Tales métodos son aproximados en el sentido de que no requieren datos perfectos y las soluciones derivadas por el sistema pueden ser propuestas con distintos grados de certeza.

Un sistema experto se diferencia de otros programas que utilicen inteligencia artificial debido a las siguientes características que poseen los sistemas expertos:

- Los sistemas expertos tratan temas de realidad compleja que normalmente requieren de una gran cantidad de conocimientos de un experto humano. Muchos programas de inteligencia artificial son realmente vehículos de búsqueda, y pueden por lo tanto centrarse en problemas matemáticos abstractos o versiones simplificadas de problemas reales para adquirir conocimientos o refinar sus técnicas. Por otro lado, los sistemas expertos resuelven problemas de genuino interés científico o comercial.
- Un sistema experto debe mostrar alto desempeño en términos de velocidad y confiabilidad para ser una herramienta útil. Los vehículos de búsqueda de inteligencia artificial, no deben tener mucha velocidad y pueden cometer errores, ya que ellos son programas, no software apoyado. Un sistema

¹ Heurística: Trata métodos o algoritmos exploratorios durante la resolución de problemas en los cuales las soluciones se descubren por la evaluación del progreso logrado en la búsqueda de un resultado final.

experto debe proponer soluciones en un tiempo razonable y debe ser acertado en la mayoría de las veces, al menos como un experto humano.

- El sistema experto debe ser capaz de explicar y justificar sus soluciones o recomendaciones al usuario, para convencerlo que su razonamiento es de verdad correcto. Los programas de búsqueda son usualmente utilizados por sus creadores o por otro personal en laboratorios similares. Un sistema experto será utilizado por un amplio rango de usuarios, por lo tanto debe ser diseñado de tal manera que sea entendible y sus procesos más sencillos (JACKSON, 1990, 5).

9.4 COMPONENTES DE UN SISTEMA EXPERTO

Un sistema experto está compuesto mínimamente por:

- La base de conocimientos.
- Mecanismo de inferencia.
- Memoria de trabajo (base de hechos).
- Interfaces (con el usuario, con el desarrollador y con otros sistemas).

También puede tener un subsistema de explicación o justificador y un subsistema de aprendizaje. La estructura de un sistema experto se puede ver en la Ilustración 18. A continuación se explicara detalladamente cada uno de estos componentes.

9.4.1 Base de Conocimientos. La información contenida en la base de conocimientos es una colección de normas que componen el conocimiento de un especialista en un área determinada. En ellas esta todo lo necesario para comprender, formular y resolver el problema. Mientras más amplia sea la base de conocimientos, mayor capacidad tendrá el sistema experto para resolver problemas (JARAMILLO, VELASQUEZ, 1993, 7).

La base de conocimientos está compuesta por dos elementos básicos:

- Hechos: Se encuentra la situación del problema la cual tiene un nombre de relación, seguido por cero o más ranuras y sus valores asociados. Por ejemplo:

Persona (Nombre "Pepito Pérez")
(Edad "25")
(Altura "1.75 mt")

Aquí el nombre de relación sería "persona" y el hecho contendría tres ranuras, las cuales serían: nombre, edad y altura.

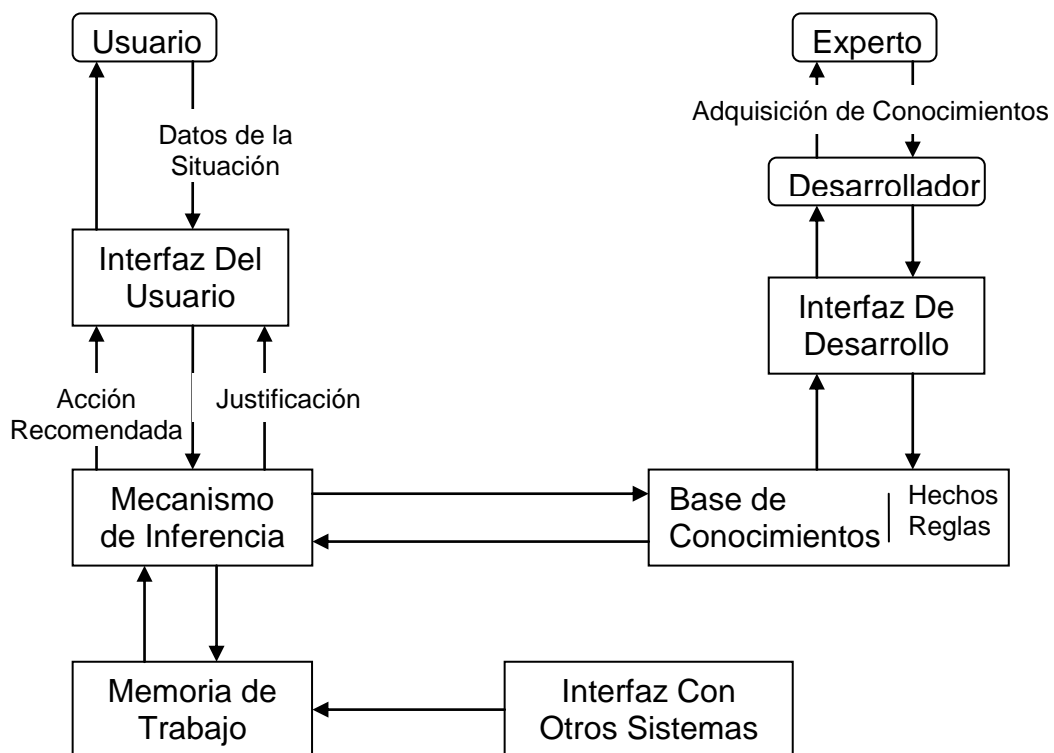
- Reglas: Estas dirigen la utilización del conocimiento para resolver problemas. Mayormente son del tipo If-Then (Si- Entonces) (RESTREPO, 1993, 12).

Por ejemplo:

Si la luz esta roja.

Entonces detenga el vehículo.

Ilustración 18. Estructura Básica de un Sistema Experto.



RESTREPO, 1993, 12.

9.4.2 Mecanismo de Inferencia. También es llamado motor de inferencia, y es quizás la parte más importante de un sistema experto, ya que recorre todas las reglas que componen la base de conocimientos con el fin de solucionar un problema. Este hace inferencias al decidir cuales reglas satisfacen los hechos u objetos, da prioridad a las reglas satisfechas y ejecuta la regla de mayor prioridad (JARAMILLO, VELASQUEZ, 1993, 8).

9.4.3 Memoria de Trabajo. También es conocida como base de hechos, ya que en ella se mantienen los conocimientos activos. Allí se mantiene una parte de la base de conocimientos, reservada para la descripción del problema actual, tal como lo especifican los datos de entrada; también es utilizada para registrar resultados intermedios. Esta memoria conserva hipótesis y decisiones de tres tipos:

Plan: Describe en forma general como se puede atacar el problema.

Agenda: Acciones potenciales esperando ejecución.

Solución: Hipótesis y decisiones candidatas que el sistema ha arrojado hasta el momento así como las dependencias que relacionan una decisión con otra (RESTREPO, 1993, 12).

9.4.4 Interfaces. Este componente hace posible la interacción entre varios tipos de entidades con el sistema experto. Las interfaces pueden ser de varios tipos:

Interfaz con el usuario: Maneja la relación directa entre el usuario y el sistema experto, presentándole preguntas para ayudar a la inferencia, o conclusiones que haya desarrollado el sistema así como algún tipo de explicación de cómo se llegó a esta conclusión, si el sistema cuenta con este módulo (JARAMILLO, VELASQUEZ, 1993, 9).

Interfaz con el desarrollador: Maneja la relación con el desarrollador del sistema para hacerle posible la actualización de la base de conocimientos o hacer mejoras al sistema.

Interfaz con otros sistemas: Maneja la relación con otros sistemas como por ejemplo bases de datos, aplicaciones o hardware como sensores para la adquisición de datos (RESTREPO, 1993, 14).

9.4.5 Subsistema de Explicación. También se conoce como justificador y este se encarga de explicarle al usuario como se llegó a determinada conclusión, porque se llegó o no a esta o qué tipo de información adicional se necesita para garantizar la confiabilidad de los resultados (RESTREPO, 1993, 15).

9.4.6 Subsistema de Aprendizaje. Es un subsistema que permite al sistema experto mejorar sus conocimientos a partir de la experiencia, tal como lo haría un experto humano. Este lo hace analizando las razones de sus éxitos y fracasos para perfeccionar la base de conocimientos y así ser más eficaz y efectivo en el futuro. No muchos sistemas expertos comerciales cuentan con este subsistema de aprendizaje por lo que su actualización se remite únicamente al desarrollador (RESTREPO, 1993, 15).

9.5 CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA EXPERTO

Describir una metodología exacta para el desarrollo de sistemas expertos es muy difícil, ya que estos aplican para un sinnúmero de ramas, y para cada una de ellas el método sería ligeramente distinto, pero realizando un análisis de varios sistemas expertos, se pueden identificar algunos elementos comunes para ellos, los cuales permiten trazar un esquema de implementación para un proyecto específico. Una metodología muy completa para el desarrollo de un sistema experto se muestra a continuación en trece pasos que van desde un análisis de factibilidad hasta el mantenimiento post-utilización.

- Análisis de la factibilidad de la aplicación.
- Formulación de requisitos.
- Diseño conceptual.
- Escogencia de las fuentes de conocimiento: Experto, Documentos, etc.

- Conformación del equipo humano de desarrollo
- Selección de herramienta de desarrollo y equipo de cómputo.
- Adquisición y representación del conocimiento.
- Verificación del prototipo.
- Validación del prototipo.
- Corridas de pasos de prueba.
- Entrega a los usuarios.
- Utilización o explotación
- Mantenimiento, Actualizaciones.(RESTREPO, 1993, 15-16)

9.6 APLICACIONES

Los sistemas expertos tienen una amplia aplicación en distintas áreas dependiendo de los conocimientos del experto. A continuación se expondrán algunas de ellas.

9.6.1 Monitorización. Es un caso particular de la interpretación, y consiste en la comparación continua de los valores de las señales o datos de entrada y unos valores que actúan como criterios de normalidad o estándares. En el campo del mantenimiento predictivo los Sistemas Expertos se utilizan fundamentalmente como herramientas de diagnóstico. Se trata de que el programa pueda determinar en cada momento el estado de funcionamiento de sistemas complejos, anticipándose a los posibles incidentes que pudieran acontecer. Así, usando un modelo computacional del razonamiento de un experto humano, proporciona los mismos resultados que alcanzaría dicho experto.

9.6.2 Diseño. Diseño es el proceso de especificar una descripción de un artefacto que satisface varias características desde un número de fuentes de conocimiento.

El diseño se concibe de distintas formas:

- El diseño en ingeniería es el uso de principios científicos, información técnica e imaginación en la definición de una estructura mecánica, máquina o sistema que ejecute funciones específicas con el máximo de economía y eficiencia.
- El diseño industrial busca rectificar las omisiones de la ingeniería, es un intento consciente de traer forma y orden visual a la ingeniería de hardware donde la tecnología no provee estas características.

Los SE en diseño ven este proceso como un problema de búsqueda de una solución óptima o adecuada. Las soluciones alternas pueden ser conocidas de antemano o se pueden generar automáticamente probándose distintos diseños para verificar cuáles de ellos cumplen los requerimientos solicitados por el usuario, ésta técnica es llamada “generación y prueba”, por lo tanto estos SE son llamados de selección. En áreas de aplicación, la prueba se termina cuando se encuentra la primera solución; sin embargo, existen problemas más complejos en los que el objetivo es encontrar la solución más óptima.

9.6.3 Planificación. La planificación es la realización de planes o secuencias de acciones y es un caso particular de la simulación. Está compuesto por un simulador y un sistema de control. El efecto final es la ordenación de un conjunto de acciones con el fin de conseguir un objetivo global.

Los problemas que presentan la planificación mediante SE son los siguientes:

- Existen consecuencias no previsibles, de forma que hay que explorar y explicar varios planes.
- Existen muchas consideraciones que deben ser valoradas o incluirles un factor de peso.
- Suelen existir interacciones entre planes de sub-objetivos diversos, por lo que deben elegirse soluciones de compromiso.
- Trabajo frecuente con incertidumbre, pues la mayoría de los datos con los que se trabaja son más o menos probables pero no seguros.
- Es necesario hacer uso de fuentes diversas tales como bases de datos.

9.6.4 Control. Un sistema de control participa en la realización de las tareas de interpretación, diagnóstico y reparación de forma secuencial. Con ello se consigue conducir o guiar un proceso o sistema. Los sistemas de control son complejos debido al número de funciones que deben manejar y el gran número de factores que deben considerar; esta complejidad creciente es otra de las razones que apuntan al uso del conocimiento, y por tanto de los SE (@WIKI3, 2008).

Cabe aclarar que los sistemas de control pueden ser en lazo abierto, si en el mismo la realimentación o el paso de un proceso a otro lo realiza el operador, o en lazo cerrado si no tiene que intervenir el operador en ninguna parte del mismo. Reparación, correcta o terapia.

La reparación, corrección, terapia o tratamiento consiste en la proposición de las acciones correctoras necesarias para la resolución de un problema. Los SE en reparación tienen que cumplir diversos objetivos, como son: Reparación lo más rápida y económicamente posible. Orden de las reparaciones cuando hay que realizar varias. Evitar los efectos secundarios de la reparación, es decir la aparición de nuevas averías por la reparación.

9.6.5 Simulación. Es una técnica consistente en crear modelos basados en hechos, observaciones e interpretaciones, sobre la computadora, a fin de estudiar el comportamiento de los mismos mediante la observación de las salidas para un conjunto de entradas. Las técnicas tradicionales de simulación requieren modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento del sistema bajo estudio.

El empleo de los SE para la simulación viene motivado por la principal característica de los SE, que es su capacidad para la simulación del comportamiento de un experto humano, que es un proceso complejo.

En la aplicación de los SE para simulación hay que diferenciar cinco configuraciones posibles:

- Un SE puede disponer de un simulador con el fin de comprobar las soluciones y en su caso rectificar el proceso que sigue.

- Un sistema de simulación puede contener como parte del mismo a un SE y por lo tanto él SE no tiene que ser necesariamente de simulación.
- Un SE puede controlar un proceso de simulación, es decir que el modelo está en la base de conocimiento del SE y su evolución es función de la base de hechos, la base de conocimientos y el motor de inferencia, y no de un conjunto de ecuaciones aritmético – lógicas.
- Un SE puede utilizarse como consejero del usuario y del sistema de simulación.
- Un SE puede utilizarse como máscara o sistema frontal de un simulador con el fin de que el usuario reciba explicación y justificación de los procesos.

9.6.6 Instrucción. Un sistema de instrucción realizara un seguimiento del proceso de aprendizaje. El sistema detecta errores ya sea de una persona con conocimientos e identifica el remedio adecuado, es decir, desarrolla un plan de enseñanza que facilita el proceso de aprendizaje y la corrección de errores.

9.6.7 Recuperación de información. Los Sistemas Expertos, con su capacidad para combinar información y reglas de actuación, han sido vistos como una de las posibles soluciones al tratamiento y recuperación de información, no sólo documental. La década de 1980 fue prolija en investigación y publicaciones sobre experimentos de este orden, interés que continua en la actualidad.

Lo que diferencia a estos sistemas de un sistema tradicional de recuperación de información es que éstos últimos sólo son capaces de recuperar lo que existe explícitamente, mientras que un Sistema Experto debe ser capaz de generar información no explícita, razonando con los elementos que se le dan. Pero la capacidad de los SE en el ámbito de la recuperación de la información no se limita a la recuperación. Pueden utilizarse para ayudar al usuario, en selección de recursos de información, en filtrado de respuestas, etc. Un SE puede actuar como un intermediario inteligente que guía y apoya el trabajo del usuario final (@WIKI3, 2008).

9.6.8 Aplicaciones de los Sistemas Expertos en el Campo del Mantenimiento Industrial. Los sistemas expertos pueden ser utilizados en el mantenimiento preventivo y predictivo de sistemas de ingeniería en casos como el de la monitorización, lo cual es un caso particular de la interpretación, y consiste en la comparación continua de los valores de las señales o datos de entrada y unos valores que actúan como criterios de normalidad o estándares. En el campo del mantenimiento predictivo los sistemas expertos se utilizan fundamentalmente como herramientas de diagnóstico. Se trata de que el programa pueda determinar en cada momento el estado de funcionamiento de sistemas complejos, anticipándose a los posibles incidentes que pudieran acontecer. Así, usando un modelo computacional del razonamiento de un experto humano, proporciona los mismos resultados que alcanzaría dicho experto.

Dado que el mantenimiento predictivo se caracteriza por la detección de fallos antes de que estos sean críticos sin alterar el funcionamiento normal de la planta, los sistemas expertos en este tipo de mantenimiento se emplean como herramientas de diagnóstico, de modo que vigilen los valores de variables y parámetros para indicar la existencia de fallos antes de que sean críticos.

El uso de sistemas expertos en mantenimiento se está incrementando en los últimos años debido a la tendencia de automatización en las máquinas y equipos de la industria, lo que conlleva a que cada vez haya un menor número de expertos disponibles para consultar en caso de estados de fallo o avería.

Mayormente en la industria se utilizan los sistemas expertos como herramientas de diagnóstico para detectar fallos incipientes en máquinas.

En sistemas rotativos los sistemas expertos se están utilizando para monitorear variables tales como vibraciones, temperatura de cojinetes, presión de lubricación, consumo de energía, gases de combustión etc.

La variable de vibraciones puede proporcionar información importante para diagnosticar el estado de una máquina rotativa, ya que de allí se pueden detectar cambios en el funcionamiento de la máquina a través del estudio de las frecuencias naturales del sistema, modo de vibración del eje, amplitud etc., es decir el análisis del espectro.

Las vibraciones de la máquina son manifestaciones de incorrectos funcionamientos que ocurren como respuesta a alteraciones de cualquier fuerza interna o modificaciones en la rigidez dinámica del sistema.

De esta manera el monitoreo continuo de la vibración debe ser archivado en una base de datos que permita una comparación histórica para realizar un análisis de tendencia y así tener un seguimiento continuo del estado de la máquina que pueda llevar a un estado de alarma para planificación de mantenimiento en caso de un estado de incorrecto funcionamiento.

En la industria de la aviación, los sistemas expertos en mantenimiento han ido haciéndose necesarios debido a los extenuantes y complicados controles manuales que se tienen que realizar por norma a estos equipos. Los sistemas expertos pueden analizar y controlar variables rápidamente que a un humano le tomaría mucho tiempo revisar. De esta manera se pueden reducir fallas y aumentar la confiabilidad del equipo, algo tan necesario en este campo de la industria.

En el Anexo 1 se presenta aplicaciones de sistemas expertos en mantenimiento.

9.7 INSTITUTOS QUE TRABAJAN CON SISTEMAS EXPERTOS

9.7.1 BERKELEY EXPERT SYSTEMS TECHNOLOGY – BEST. Laboratorio perteneciente al departamento de ingeniería mecánica de la University of California at Berkeley dedicado a la investigación de inteligencia artificial, sistemas expertos y tecnologías de la información, dirigido por la profesora Alice Agogino. En este laboratorio se desarrollan sistemas expertos aplicados a muchos campos de la industria entre ellos el monitoreo de condiciones y validación de señales de sensores.

Información Adicional:

<http://best.me.berkeley.edu/>

Professor Alice M. Agogino

email: aagogino@me.berkeley.edu

6102 Etcheverry Hall

Department of Mechanical Engineering

University of California at Berkeley
Berkeley, CA 94720-1740
Telefono: 510-643-8146
Fax: 510-643-8982

9.7.2 GRUPO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL. El Grupo en Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial está adscrito a la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia Sede-Medellín. Fue reconocido por COLCIENCIAS como grupo de excelencia en la categoría A, en noviembre de 2006, para el periodo 2006 - 2009.

Entre sus líneas de investigación se encuentra la de sistemas basados en conocimientos cuyo objetivo principal es el de diseñar sistemas expertos que aporte soluciones a problemas, como si lo hiciera un humano, es decir, realizar un sistema capaz de aportar soluciones inteligentes.

Información Adicional:

<http://www.unalmed.edu.co/~gidia/se.html>

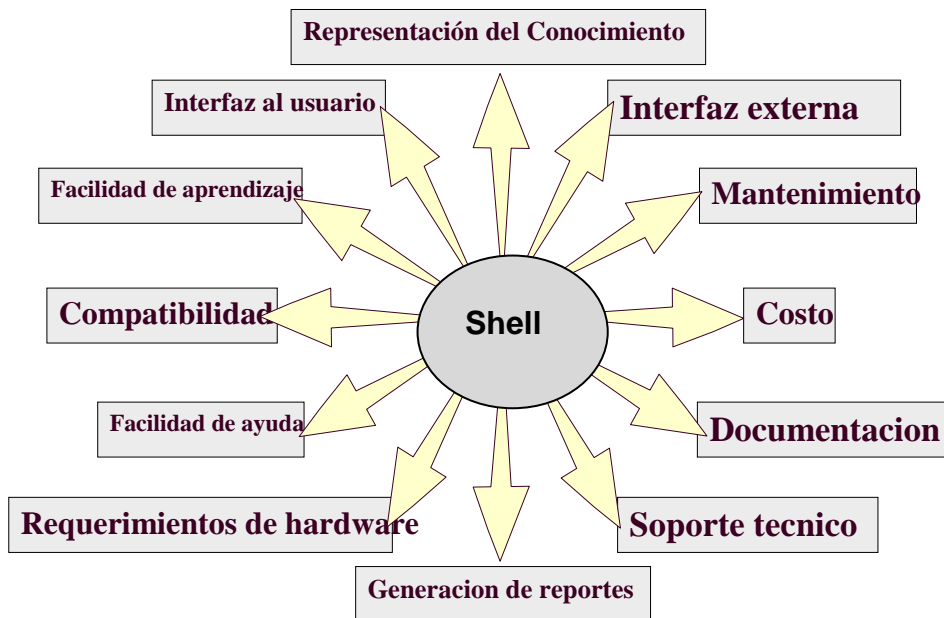
Grupo de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial, Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

10 PAQUETES COMPUTACIONALES.

Con la creciente demanda de shells (Véase sección 9.1.3) para el desarrollo de sistemas expertos, el mercado ofrece gran variedad de herramientas especializadas en el desarrollo de dichos sistemas. A continuación se estudiarán tres softwares muy influyentes en el desarrollo de sistemas expertos los cuales son Acquire, Jess y Corvid.

Los factores más influyentes para la selección de un software para el desarrollo de sistemas expertos se muestran en la Ilustración 19.

Ilustración 19. Criterios de Selección de Software



10.1 ACQUIRE

Software de la empresa ACQUIRED INTELLIGENCE² la cual es una empresa de desarrollo de software que ha venido desarrollando productos y aplicaciones basados en el conocimiento desde 1987. Acquire es una herramienta de desarrollo de sistemas expertos que se utiliza en todo el mundo, y ha

² Acquired Intelligence: Empresa canadiense ubicada en la ciudad de Victoria, British Columbia.

proporcionado servicios de ingeniería del conocimiento para el desarrollo de software en América del Norte, América del Sur y Europa.

El software Acquire ofrece una metodología paso a paso para la adquisición y estructuración de los conocimientos a fin de que personas sin conocimientos de programación, puedan desarrollar aplicaciones de sistemas expertos. Esta interacción directa de expertos en la materia, mejora la calidad, precisión y facilidad de uso, y disminuye el tiempo y costo de desarrollo y mantenimiento. Acquire incluye un kit de desarrollo de software para que los programadores puedan integrar sus bases de conocimiento con otras aplicaciones de software, desarrollar interfaces al usuario personalizadas, añadir funcionalidad computacional, o desplegar las bases de conocimientos en un modelo cliente / servidor o entorno de Internet.

La metodología estructurada de Acquire le permite crear una base de conocimientos mientras que el motor de inferencia permite que otros utilicen ese conocimiento. Los programadores utilizan el Acquire SDK (Software Development Kit) para integrar las bases de conocimientos con cualquier aplicación de software y el Acquire Service (NT/2000/XP) para operar en un entorno cliente / servidor. Personas sin conocimientos de programación pueden desplegar sus bases de conocimientos en la web usando myAcquire.

10.1.1 Fortalezas. A continuación se describirán las mayores fortalezas de este producto.

Enfoque estructurado: una metodología paso a paso para adquirir y representar el conocimiento elimina la necesidad de capacitación especializada.

Adquisición de conocimientos por reconocimiento de patrones: Las personas reaccionan a las situaciones que reconocen, lo que es la base de conocimientos en las personas y en Acquire. Las reglas especifican el patrón de información que debe reconocerse en una situación y la reacción que se debe tener. Estas acciones pueden generar nuevos patrones reconocidos por otras reglas, y así sucesivamente. Por lo tanto, un sistema experto captura el conocimiento basado en patrones que se aplica en una secuencia de ciclos de reconocimiento y actuación.

Base de conocimientos completa y consistente: la minuciosidad del desarrollo paso a paso basado en el reconocimiento de patrones, minimiza los errores porque todas las situaciones que un usuario pueda reconocer, son especificadas y manejadas adecuadamente. La adecuada estructuración de la base de conocimientos, elimina de la consideración patrones irrelevantes.

Manejo comparativo de la incertidumbre: muchos sistemas manejan la incertidumbre con valores de confianza numéricos, pero las personas no especifican esos números absolutamente confiablemente. Por esto, los números son sobrevalorados y esto lleva a resultados poco confiables en una aplicación. Acquire maneja la incertidumbre comparativamente, consistentemente con la forma de pensar humana, lo que resulta en un mayor rendimiento de las aplicaciones.

Amplia documentación en su página web con tutoriales en video así como soporte técnico.

Una versión de evaluación de 30 días está disponible en la página web.

10.1.2 Debilidades. No posee módulo para generación de prototipos, ni ejecuciones de prueba para ver errores en la lógica.

La estructuración de las reglas no se realiza mediante arboles de lógica lo que puede hacer más difícil de seguir la estructura del sistema.

No posee ventana de vista fácil de las reglas lo cual puede ser un inconveniente, ya que si se desea ver una regla, se tiene que buscar y seguir esta desde el principio del sistema.

10.1.3 Requerimientos del Sistema

- Windows 95, 98, NT, ME, 2000 o XP.
- Bajo pedido, se puede hacer disponible para plataformas Unix o Linux.

10.1.4 Costo. \$495 USD - licencia individual de Acquire incluyendo ACQUIRE, SDK, servidor y documentación para descarga y en CD.

10.1.5 Contacto

Página Web: <http://www.aiinc.ca/>

Información: info@aiinc.ca o teléfono: 1-250-479-8646

Soporte Técnico: support@aiinc.ca

10.2 CORVID

Este es un software de la empresa Exsys Inc³. La cual comenzó con el desarrollo de sistemas expertos para computador en 1983 y fue la primera en traer estos sistemas a la web en 1999.

Corvid nace de un examen minucioso de lo necesario para construir sistemas para la toma de decisiones en el actual mundo orientado al internet. Corvid está diseñado para permitir desarrollar y desplegar poderosas aplicaciones de asesoría interactivas y en línea de forma fácil y rápida.

La mayor parte de las decisiones tomadas por los expertos son pensadas y descritas en forma de reglas Si-Entonces. Esta es la misma forma en la cual el conocimiento es descrito en Corvid. De hecho, los pasos en la construcción de un sistema son muy similares a explicar a una persona cómo es tomada una decisión. Las herramientas incorporadas en el software, ayudan a los desarrolladores a pensar y describir sus pasos en la toma de decisiones y su lógica en la solución de problemas.

10.2.1 Fortalezas. Los bloques lógicos de esta herramienta definen, organizan y estructuran la información de la toma de decisiones en bloques lógicos relacionados. La lógica puede ser una compleja ramificación de árboles que cubren sistemáticamente todos los posibles casos de entrada o de un simple diagrama que corresponde a una regla simple. Esto permite que un simple bloque sea organizado para tener toda la lógica de un aspecto de un problema en una estructura simple. La ventana de vista de reglas, permite que la lógica de un sistema se vista simultáneamente leyendo la regla y la estructura completa del sistema en la ventana de bloques lógicos.

³ Exsys Inc.: Empresa estadounidense localizada en Albuquerque, New México.

Los sistemas construidos con esta herramienta pueden ser entregados a través de la web utilizando el Corvid Servlet Runtime, el cual construye paginas html dinámicamente para la interface al usuario, o con el Java Applet Runtime el cual ejecuta el sistema en el computador del usuario. Los sistemas se pueden comunicar con bases de datos a través de interfaces ODBC/JDBC y comandos SQL. Otros programas pueden ser llamados del lado del servidor mediante CGI, ASP y JSP para acceder a bases de datos o realizar cálculos personalizados. La herramienta también puede ejecutarse como una aplicación independiente que permite que le permite integrarse en otras arquitecturas de información.

El entorno de desarrollo permite una amplia gama de posibilidades para el control de la apariencia del programa. Tanto texto e imágenes se pueden incorporar con completo control de fuentes, colores, estilos, fondos y posición. Las plantillas del Servlet Runtime permiten la flexibilidad completa que ofrece el HTML para el diseño del sitio. En una sola pantalla se pueden hacer varias preguntas, generar reportes complejos en una sola ventana del explorador y guardar estos resultados en bases de datos.

Este software cuenta con una excelente documentación así como soporte técnico en línea.

Una versión de evaluación de 30 días está disponible en la página web.

10.2.2 Debilidades. El costo de este software es muy elevado y la licencia es solo para un desarrollador. El contrato de soporte técnico solo se extiende a un año.

10.2.3 Requerimientos del Sistema

- Microsoft Windows NT 4.0 con Service Pack 3 o Windows 95, 98, ME, 2000 o XP.
- Microsoft Internet Explorer 5.0 o superior.
- 75 MB de espacio libre en disco.
- Resolución mínima en pantalla: 1024 x 768 con fuentes normales o 1156 x 864 con fuentes grandes.

10.2.4 Costo. \$12.450 USD, Incluye: Licencia para un desarrollador, en un computador, en un servidor. Licencia de distribución de Java Applet Runtime para un servidor. 20 copias de licencia de distribución para aplicaciones independientes. Un año del software Exsys Corvid con un contrato de soporte técnico.

10.2.5 Contacto

Página Web: <http://www.exsys.com>

Información: info@exsys.com o teléfono 1-505-888-9494

Soporte Técnico: support@exsys.com

10.3 JESS

Jess es un motor de reglas y ambiente ápto para crear scripts⁴, escrito por completo en lenguaje Sun Java por Ernest Friedman-Hill en el Sandia National Laboratories⁵ en Livermore, California. Usando Jess es posible desarrollar software Java con capacidad de razonar utilizando el conocimiento provisto en forma de reglas declarativas. El software a pesar de ser ligero y pequeño, tiene un motor de inferencia muy rápido. Su lenguaje de programación da acceso a todas las API (Applications Programming Interface) de Java. El software incluye un entorno de desarrollo con todas las funciones, basado en la plataforma Eclipse.

Fortalezas. El software utiliza una versión mejorada del algoritmo Rete⁶ para el procesamiento de reglas.

⁴ **Script:** conjunto de instrucciones generalmente almacenadas en un archivo de texto que deben ser interpretados línea a línea en tiempo real para su ejecución.

⁵ **Sandia National Laboratories:** Instituto gubernamental de soporte a la seguridad nacional, ubicado en Livermore, California.

⁶ **Algoritmo eficiente en el reconocimiento de patrones aplicado en sistemas de procesamiento de reglas y sistemas expertos.**

Posee muchas características útiles como encadenamiento hacia atrás, consultas a la memoria de trabajo y manipulación y razonamiento directo con objetos Java.

Es también un potente entorno de programación Java, a partir de la cual puede crear objetos Java, llamar métodos Java e implementar interfaces Java sin compilar ningún código. Es altamente compatible con otros sistemas y genera reportes a pedido del usuario.

La licencia es gratis para estudiantes y grupos de investigación.

Este software cuenta con un tutorial en la página web así como soporte técnico.

En la página web existe un demo del software.

10.3.1 Debilidades. El ambiente para desarrollar sistemas expertos en Jess es muy diferente a los demás sistemas comerciales, debido a que se necesitan conocimientos de programación en lenguaje Java. La interface para el desarrollador es del tipo en el cual es necesario escribir código en Java.

El software requiere aplicaciones diferentes, algunas de las cuales no vienen dentro del programa, pero su licencia es gratis y se pueden descargar desde internet.

Al no poseer una interfaz grafica, es un software más complicado de aprender a usar.

El software no posee módulo de generación de prototipos para realizar ejecuciones de prueba y detectar errores en la lógica.

10.3.2 Requerimientos del Sistema

- Cualquier versión de Windows, Unix o Macintosh.
- Tener instalado Java Virtual Machine (JVM). Disponible en Sun Microsystems.
- Tener instalado Eclipse SDK. Disponible en www.eclipse.org.

10.3.3 Costo. Licencia gratis para estudiantes y grupos de investigación.

10.3.4 Contacto

Página Web: <http://www.jessrules.com/>

Información: casmith@sandia.gov

Soporte Técnico: ejfried@sandia.gov

10.4 COMPARACION DE SOFTWARE

Se realizó una comparación cualitativa entre los tres programas exponiendo sus fortalezas y debilidades. A continuación se propone una comparación cuantitativa que puede ser sujeta a verificación ya que esta basada en datos proporcionados en la documentación técnica y de publicidad de los programas. Se propone los siguientes aspectos a considerar para la evaluación del software:

- 1- ¿El software opera bajo la plataforma XP o superior?
Si (10 puntos)
No (5 puntos)
- 2- ¿El software requiere otros programas o aplicaciones distintas a las comunes?
Si (0 puntos)
No (10 puntos)
- 3- ¿De necesitar otras aplicaciones, están estas incluidas en el producto?
Si (10 puntos)
No (0 puntos)
- 4- ¿El software tiene interfaz gráfica al desarrollador?
Si (10 puntos)
No (0 puntos)
- 5- ¿El software requiere habilidades de programación en algún lenguaje específico?
Si (0 puntos)
No (10 puntos)
- 6- ¿El software es fácil de utilizar?
Si (10 puntos)
No (0 puntos)

- 7- ¿El software es de fácil aprendizaje?
Si (10 puntos)
No (0 puntos)
- 8- ¿El software es compatible con otras aplicaciones y/o bases de datos?
Si (10 puntos)
No (0 puntos)
- 9- ¿El software genera reportes a petición del desarrollador?
Si (10 puntos)
No (0 puntos)
- 10- ¿El software genera prototipos de prueba?
Si (10 puntos)
No (0 puntos)
- 11- ¿El software hace ejecuciones de prueba para detectar errores en la lógica?
Si (10 puntos)
No (0 puntos)
- 12- ¿El software permite crear interfaces personalizadas?
Si (10 puntos)
No (0 puntos)
- 13- ¿Cómo es representado el conocimiento en el software?
Reglas (10 puntos)
Frames (5 puntos)
- 14- ¿El software posee ventana de vista fácil de las reglas?
Si (10 puntos)
No (0 puntos)
- 15- ¿El software posee estructuración en arboles de reglas?
Si (10 puntos)
No (0 puntos)
- 16- ¿El motor de inferencia puede ejecutar encadenamiento hacia delante y hacia atrás?
Solo hacia delante (5 puntos)
Solo hacia atrás (8 puntos)

En ambos sentidos (10 puntos)

17- ¿Qué tanta documentación técnica y manuales de usuario posee el software?

Buena (10 puntos)

Normal (5 puntos)

Mala (0)

18- ¿El software posee soporte técnico en línea?

Si (10 puntos)

No (0 puntos)

19- ¿El fabricante ofrece programas adicionales de capacitación en Medellín?

Si (10 puntos)

No (0 puntos)

20- ¿Cuál es el precio del producto en USD?

0-1.000 USD (10 puntos)

1.000-10.000 USD (5 Puntos)

Mayor de 10.000 USD (0 puntos)

21- ¿Cuánto tiempo dura la licencia?

Mayor a un Año (10 puntos)

Menor o Igual a un Año (0 puntos)

En la Tabla 2 se muestra la comparación realizada en cuanto a aspectos funcionales, técnicos y económicos de las tres herramientas mencionadas anteriormente.

En dicha tabla se encuentran representadas numéricamente estas preguntas, dándole un peso igual a cada una de ellas. Con las respuestas a estas preguntas se procede a llenar la tabla para de esta manera concluir cual es el software más conveniente para el proyecto según los criterios mencionados anteriormente.

El soporte a los resultados de esta tabla puede ser consultado en los manuales de cada programa, los cuales pueden ser consultados en los siguientes sitios de internet:

Acquire: <http://www.aiinc.ca/acquire/acquire.shtml>

Jess: <http://www.jessrules.com/jess/docs/71>

Corvid: <http://www.exsys.com/manuals.html>

Tabla 2. Comparación Software

CRITERIO	Peso Criterio	SOFTWARE									
		ACQUIRE			CORVID			JESS			
1	Plataforma	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%
2	Aplicaciones Diferentes	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%	-	4,8%	0,0%
3	Aplicaciones Incluidas	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%	-	4,8%	0,0%
4	Interfaz Grafica	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%	-	4,8%	0,0%
5	Habilidades de Programación	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%	-	4,8%	0,0%
6	Facilidad de Uso	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%	-	4,8%	0,0%
7	Facilidad de Aprendizaje	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%	-	4,8%	0,0%
8	Compatibilidad	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%
9	Generación de Reportes	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%
10	Generación de Prototipos	4,8%	-	4,8%	0,0%	10	4,8%	4,8%	-	4,8%	0,0%
11	Ejecuciones de Prueba	4,8%	-	4,8%	0,0%	10	4,8%	4,8%	-	4,8%	0,0%
12	Creación de Interfaces	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%
13	Representación Conocimiento	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%
14	Vista de Reglas	4,8%	-	4,8%	0,0%	10	4,8%	4,8%	-	4,8%	0,0%
15	Estructuración de Reglas	4,8%	-	4,8%	0,0%	10	4,8%	4,8%	-	4,8%	0,0%
16	Encadenamiento	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%
17	Documentación Técnica	4,8%	5	4,8%	2,4%	10	4,8%	4,8%	-	4,8%	0,0%
18	SopORTE Técnico	4,8%	10	4,8%	4,8%	10	4,8%	4,8%	-	4,8%	0,0%
19	Capacitación	4,8%	-	4,8%	0,0%	10	4,8%	4,8%	-	4,8%	0,0%
20	Precio	4,8%	10	4,8%	4,8%	-	4,8%	0,0%	10	4,8%	4,8%
21	Tiempo Licencia	4,8%	10	4,8%	4,8%	-	4,8%	0,0%	10	4,8%	4,8%
	TOTAL	100,0%	155	100%	73,8%	190	100%	90,5%	80	100%	38,1%

Después de la comparación cualitativa y la propuesta cuantitativa expresada en la Tabla 2, se propone que el software más apropiado para el proyecto es el Corvid de la empresa Exsys Inc. Ya que este muestra grandes fortalezas en su interfaz grafica y estructuración y según la propuesta en la Tabla 2 sus mayores debilidades son su costo y el tiempo de duración de la licencia.

11 HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

11.1 INTRODUCCION

Dentro del software computacional para el desarrollo de sistemas expertos, está el Corvid desarrollado por Exsys, especializado en el desarrollo de sistemas expertos (Manual Exsys Corvid).

La herramienta permite emular eficientemente las reglas lógicas y procedimientos usados por expertos en un sistema fácil de leer, entender y mantener.

El programa permite al usuario una interacción con el sistema, tal como si estuviera teniendo una conversación con el experto; produciendo avisos y recomendaciones para una situación específica en un gran rango de temas.

El sistema entrega respuestas, no solo información para resolver el problema sino que puede acceder y analizar información externa, automatizar reportes, monitorear problemas en desarrollo, producir diagnósticos, optimizar operaciones, alertar a los operadores de situaciones inusuales y desempeñar muchas otras tareas de ayuda a la toma de decisiones.

El sistema elabora preguntas de forma lógica, pasando por alto preguntas innecesarias, pero preguntando por mayores detalles cuando son necesarios. Cuando el sistema obtiene toda la información necesaria, este produce respuestas precisas al problema planteado.

11.2 FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA

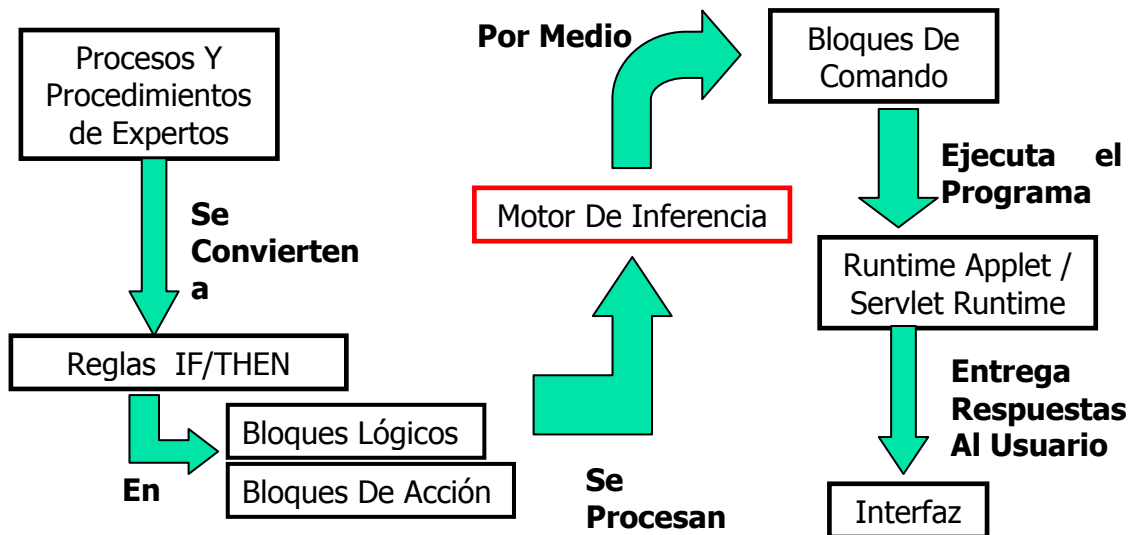
Cuando se desarrolla un sistema, los procesos y procedimientos necesarios para la toma de decisiones de un experto, son convertidos a reglas, las cuales son una representación lógica de estos, que el computador puede procesar.

Estas reglas son analizadas por el motor de inferencia del sistema, el cual determina como usarlas para realizar determinada acción o alcanzar una meta.

El sistema hace preguntas al usuario que le permiten determinar cuáles reglas son validas y poder este procesarlas. En la sección 11.3 se explicará con

mayor detenimiento acerca de las reglas, motor de inferencia y otros elementos necesarios en el desarrollo de sistemas expertos esta herramienta. Véase Ilustración 20 para un esquema de funcionamiento de la herramienta.

Ilustración 20. Diagrama Funcionamiento de la Herramienta Computacional.



11.3 COMPONENTES PRINCIPALES DE LA HERRAMIENTA

A continuación se describirán los principales componentes que utiliza la herramienta computacional seleccionada.

11.3.1 Reglas. Un sistema construido con esta herramienta está basado en reglas (Véase sección 9.4.1), las cuales describen la lógica del proceso de toma de decisiones.

El ambiente de la herramienta simplifica el proceso ya que ayuda a organizar reglas que tienen relación, en estructuras de arboles de lógica. Lo más importante en estos árboles son las reglas, ya que estos son simplemente una ayuda para estructurar la lógica y hacer más fácil su vista, entendimiento y mantenimiento.

Estas reglas son procesadas por el motor de inferencia, el cual las combina y guía al usuario a los resultados.

En una representación del conocimiento basada en reglas, cada regla de los expertos se llama heurística (Véase sección 9.4.3), la cual es un pequeño

factor que ayuda a tomar una parte de la decisión. La combinación de todas estas heurísticas permite resolver todo el problema de toma de decisiones. Una gran parte a tener en cuenta al desarrollar un sistema en esta herramienta, es identificar los pasos individuales de decisión y convertirlos a una forma que el computador pueda utilizar.

Existen muchas maneras de describir las heurísticas para un problema de toma de decisiones, pero probablemente la más efectiva y eficiente es la regla If-Then (Si-Entonces). En esta regla la parte If puede ser probada como cierta o falsa basado en la información obtenida para un caso o situación específico. Cuando la parte If resulta verdadera, se añade información al sistema con la parte Then de la regla.

En esta regla se pueden utilizar funciones booleanas como AND, OR, NOT y sus combinaciones.

11.3.2 Mecanismo de Inferencia. Es usado para analizar y combinar reglas individuales que ayuden a resolver un problema mayor (Véase sección 9.4.2).

El mecanismo de inferencia determina:

- Posibles soluciones al problema.
- Información necesaria para determinar si una respuesta en particular es apropiada.
- Si hay alguna manera para calcular la información necesaria a partir de otras reglas.
- Como diferenciar entre varias respuestas posiblemente correctas.
- Cual respuesta es más apropiada basándose en las reglas.

El mecanismo de inferencia de esta herramienta es lo que hace las reglas If-Then muy diferentes a los comandos If-Then en lenguajes de programación comunes tales como Visual Basic y C++. Las reglas no son equivalentes a líneas de código, son hechos que son combinados automáticamente de varias maneras por el motor de inferencia. De esta manera, la herramienta tiene un acercamiento al conocimiento más efectivo que las técnicas tradicionales de programación.

Adicionalmente, el mecanismo de inferencia controla la presentación y formato de las preguntas y respuestas dadas al usuario final.

El mecanismo de inferencia procesa tanto comandos de procedimiento (usualmente en bloques de comando) como reglas lógicas en bloques lógicos y bloques de acción. Las reglas pueden ser corridas usando encadenamiento hacia adelante o hacia atrás.

Cuando un programa es corrido, la herramienta crea un archivo con las reglas y comandos en el sistema y los pasa al programa de Corvid runtime, el cual contiene el mecanismo de inferencia.

La herramienta posee dos opciones de programa runtime: El Corvid applet runtime, el cual corre en una ventana del navegador en el computador del usuario y el Corvid servlet runtime el cual corre en un servidor y envía formas html al navegador web. Los dos programas runtime pueden ser utilizados para correr un sistema experto, solo depende de cuanta complejidad y estética se quiera en la interfaz al usuario. Cuando se está desarrollando la lógica, el applet runtime es el normalmente utilizado.

11.3.3 Encadenamiento Hacia delante o Hacia Atrás. El mecanismo de inferencia tiene dos maneras de probar y utilizar las reglas: encadenamiento hacia delante o hacia atrás. También se refieren a ellas como “guiadas por la información” (encadenamiento hacia adelante) o “guiadas por el objetivo” (encadenamiento hacia atrás) pero es más sencillo pensar en ellas como “en orden” (encadenamiento hacia adelante) o “cuando se necesitan” (encadenamiento hacia atrás).

Un sistema tiene un gran rango en el número de reglas dependiendo de su tamaño; unas pocas docenas si es un sistema pequeño hasta varios miles en sistemas grandes. Estas reglas típicamente están divididas en varias secciones, los cual las provee de un orden.

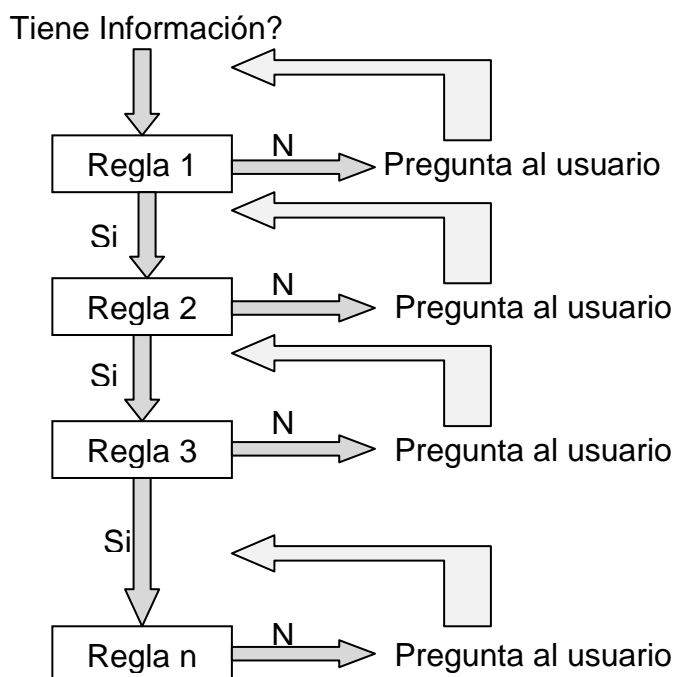
Los bloques lógicos usan diagramas de árbol para estructurar las reglas. La primera rama del árbol sería la primera regla, la segunda regla sería la segunda rama y así sucesivamente.

El mecanismo de inferencia puede correr las reglas de dos maneras encadenamiento hacia delante o encadenamiento hacia atrás.

11.3.3.1 Encadenamiento Hacia Delante. Cuando las reglas son corridas hacia delante, estas son corridas en orden, es decir, la primera regla del sistema se probara primero. Si el sistema no posee información suficiente para determinar si la condición “If” es verdadera o falsa, el hará preguntas al usuario para obtener la información específica necesaria para probar dicha condición (Véase Ilustración 21). Si la condición “If” es verdadera, la declaración en la parte Then será considerada verdadera y añadida a lo que el sistema “sabe”. Luego se moverá a la segunda regla, repetirá el proceso, se moverá a la tercera, repetirá el proceso y así sucesivamente hasta alcanzar el final de las reglas. El encadenamiento hacia delante también es conocido como “guiado por la información” ya que las reglas se corren con un arreglo de datos de entrada para ver cuáles son los resultados.

En el encadenamiento hacia delante, el mecanismo de inferencia usa las reglas en orden, sin consideración de la pertinencia de los valores que se pueden adquirir por la declaración en la parte “Then” de la regla.

Ilustración 21. Diagrama Encadenamiento Hacia Delante



11.3.3.2 Encadenamiento Hacia Atrás. La otra manera en la cual el motor de inferencia puede utilizar las reglas se llama encadenamiento hacia atrás. Aquí las reglas no son utilizadas en orden, más bien son utilizadas basadas en la necesidad de alcanzar un objetivo. Los objetivos son ítems específicos de información. Un objetivo para el encadenamiento hacia atrás puede ser creado de dos maneras:

- Los comandos le dicen al motor de inferencia que determine el valor de algo, hallar este valor se convierte en el objetivo de máximo nivel.
- Cuando prueba la condición If en una regla, si un ítem de información no es conocido, este se convertirá en el nuevo objetivo, reemplazando temporalmente el objetivo actual.

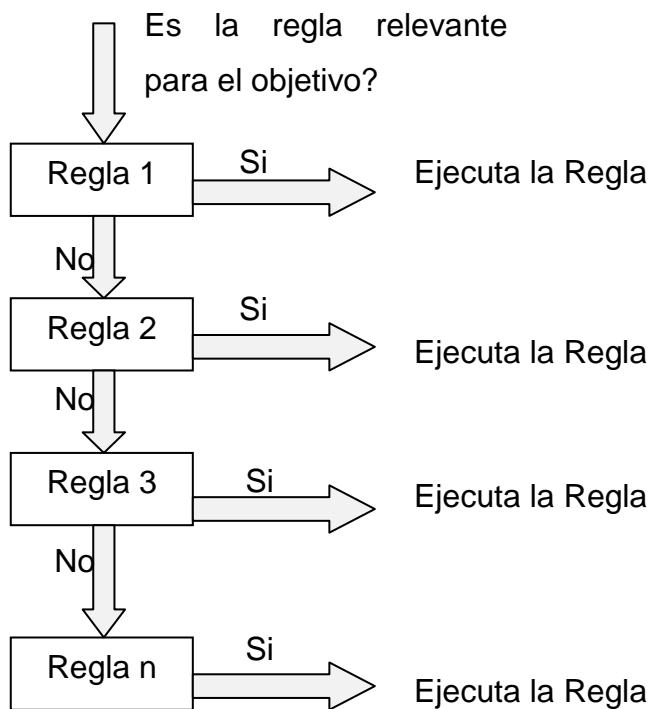
En el encadenamiento hacia atrás, el motor de inferencia mirará a través de las reglas, para buscar cual es relevante para el objetivo. En este caso, relevante significa que la información necesaria aparece en la parte Then de la regla. La regla puede estar en cualquier parte del sistema, lo único que importa es que esta tenga el potencial de proveer la información necesaria en el momento. La regla será probada y determinada falsa o verdadera basándose en la información ingresada por el usuario (Véase Ilustración 22).

Si existe otra regla que pueda proveer información relevante para el objetivo, esta será probada de segunda. El encadenamiento hacia atrás utiliza únicamente las reglas que son relevantes para un objetivo específico.

La ventaja del encadenamiento hacia atrás es su recursividad, debido a que su objetivo actual cambia temporalmente basándose en la información que necesita en el momento.

La forma en la cual el encadenamiento (hacia delante o hacia atrás) es llamado en un sistema es determinada por el comando usado para correr las reglas. El encadenamiento hacia delante es usado cuando un arreglo específico de reglas es corrido como bloque de acción. El encadenamiento hacia atrás es usado cuando un comando le pide al sistema hallar el valor para un objetivo específico, o sea utilizando bloques lógicos. Los bloques lógicos pueden utilizar encadenamiento hacia delante o hacia atrás según sea requerido.

Ilustración 22. Diagrama Encadenamiento Hacia Atrás



11.3.4 Tipos de Variables. En la herramienta se emplean diversos tipos de variables según el caso. A continuación se explicarán las variables que admite el sistema.

- Lista Estática: Es un tipo de variable que tiene una lista específica de valores posibles. Esta variable se usa en preguntas de selección múltiple y puede haber cualquier número de posibles respuestas. Los valores posibles permanecen constantes para cualquier usuario del sistema.
- Lista Dinámica: Es un tipo de variable que como la lista estática tiene una lista específica de posibles valores, pero a diferencia de la estática, los valores son ingresados dinámicamente a medida que se corre el sistema. Los valores pueden provenir de varias fuentes, ya sea de una fuente externa o de la lógica del sistema.
- Numérica: esta es una variable a la cual se le asigna un valor numérico. Puede provenir de distintas fuentes como preguntas al usuario, calculado por el sistema, extraído de fuentes externas etc.

- Cadena de Caracteres: esta es una variable a la cual se le asigna una cadena de caracteres de texto. El valor de la cadena de caracteres puede probarse por la lógica de diferentes maneras para construir condiciones. Pero generalmente se utilizan para identificar información proveniente de una fuente externa o para generar reportes.
- Fecha: esta es una variable a la cual se le asigna un valor que es una fecha. La fecha puede ser una fecha calendario o puede incluir horas exactas. Este tipo de variable se utiliza cuando el sistema es dependiente del tiempo.
- Colección/ Reporte: Son un tipo de variable muy funcional y está compuesta de varias cadenas de caracteres de texto. Estas cadenas de caracteres de texto, son añadidos por el programa para generar reportes y se van ingresando a la variable a medida que se corre el programa. Este tipo de variables puede contener cualquier número de datos e información.
- Confiabilidad: Esta es una variable a la cual se le asigna un valor que refleja el grado de certeza de un resultado o recomendación específica. Esta variable es un número pero expresa que tan confiable es el resultado para una situación específica.

11.3.5 Bloques Lógicos. En la herramienta, las reglas se definen, organizan y estructuran mediante bloques lógicos relacionados. Estos bloques son grupos de reglas que pueden ser definidos en diagramas de árbol o como reglas individuales según el caso. Cada bloque puede contener varias reglas, varios árboles o tan solo una simple regla. Usualmente, cada bloque lógico agrupa reglas relacionadas para un aspecto específico del proceso de toma de decisiones.

El contenido de cada bloque esta hecho de nodos que pueden ser pruebas booleanas si se encuentran en la parte If de la regla o sentencia si se encuentra en la parte Then de la regla.

11.3.6 Bloques de Acción. Los bloques de acción son una manera muy simple de construir sistemas pequeños, ya que en ellos se resuelven los problemas haciendo al usuario una serie de preguntas que lo guiaran hasta el resultado. Las filas en los bloques de acción, representan una regla completa, y en la parte Then de la regla se decidirá que paso seguir dependiendo de la respuesta.

La diferencia entre los bloques lógicos y los bloques de acción radica en la complejidad del sistema a construir. Los bloques lógicos permiten infinitas reglas anidadas en estructuras de árbol, mientras que los bloques de acción no permiten el anidado de reglas.

11.3.7 Bloques de Comando. En los bloques lógicos y bloques de acción esta la base de conocimientos del sistema. En ellos se encuentran las reglas y toda la información relacionada con el problema a resolver, ellos responden la pregunta “¿Cómo hacer para resolver el problema?”. En los bloques de comando se resuelve la pregunta “¿Qué hacer con la información?”. En los bloques de comando esta la información de los comandos procedimentales que le dice al motor de inferencia que hacer con las reglas. La separación de los comandos procedimentales en los bloques de comando de la lógica del sistema, permiten construir y mantener los sistemas más fácilmente. Cada sistema debe tener al menos un bloque de comando.

Los usos más comunes de los bloques de comando son:

- Determinar si las reglas serán corridas en encadenamiento hacia delante o hacia atrás.
- Controlar el orden el cual serán ejecutados los bloques.
- Determinar el objetivo para el encadenamiento hacia atrás.
- Obtener información de fuentes externas al principio de la sesión.
- Enviar los resultados y recomendaciones del sistema a otros programas.
- Ejecutar arreglos de reglas varias veces para ciclos For o While.
- Realizar preguntas al usuario en un orden determinado.
- Mostrar ventanas complementarias de ayuda u otros procesos explicativos.

- Mostrar reportes
- Enviar e-mails.

11.4 COMPARACION HERRAMIENTA COMPUTACIONAL CON LA TEORIA DE SISTEMAS EXPERTOS

Para desarrollar un sistema experto completo se deben tener en cuenta todos los componentes que comprenden dicho sistema los cuales son: base de conocimientos, motor de inferencia, memoria de trabajo, interfaces (usuario, desarrollador y otros sistemas), subsistema de explicación y subsistema de aprendizaje. A continuación se referenciará como la herramienta seleccionada cumple con estos requisitos.

11.4.1 Base de Conocimientos. En la herramienta, esta se va componiendo cada vez que el desarrollador ingresa información (previamente obtenida del experto) al sistema (Véase sección 9.4.1). Mientras mayor sea la información ingresada, mas grande será la base de conocimientos y mayor número de problemas se podrán resolver eficientemente. En la herramienta la información se ingresa al sistema en forma de reglas, las cuales hacen referencia a variables previamente establecidas. No existe un número límite de reglas ni variables en la herramienta, de tal manera se garantiza que la base de conocimientos puede ser tan grande como se considere necesario.

11.4.2 Mecanismo de Inferencia. El mecanismo de inferencia de la herramienta es un mecanismo muy poderoso (Véase sección 9.4.2), el cual permite correr el programa y hacer inferencias en las reglas para determinar una solución para un problema determinado. El motor de inferencia es el encargado de buscar la información necesaria en la base de conocimientos, que conduzca a una solución óptima del problema específico. El motor de inferencia puede correr de dos manera, encadenamiento hacia delante o hacia atrás según sea el enfoque del sistema y la manera que el desarrollador determine mejor para el usuario.

11.4.3 Memoria de trabajo. La memoria de trabajo (Véase sección 9.4.3) es almacenada por el programa de Runtime cada vez que el usuario corre el sistema. Allí se almacena la información que va encontrando el motor de inferencia a medida que busca en la base de conocimientos. La forma en que se guarda esta memoria de trabajo es determinada por el programa Runtime con que se ejecute el sistema (Applet Runtime y Servlet Runtime). Dependiendo de esto, la información se guarda en una carpeta temporal en el disco duro del computador donde se está ejecutando el programa o en un servidor.

11.4.4 Interfaces. La herramienta cuenta con los tres tipos de interfaces descritos anteriormente (al desarrollador, al usuario y a otros sistemas). (Véase sección 9.4.4)

La interface al desarrollador es muy amigable y fácil de utilizar para desarrollar el programa. La base de conocimientos se va creando a medida que se añaden reglas al sistema, lo cual es un proceso relativamente simple debido a la sencillez de la interface.

La interface al usuario puede variar mucho dependiendo del desarrollador, ya que este es quien puede embellecer y expresar de forma mas grafica sus preguntas y respuestas al usuario. El desarrollador es quien define el formato de la interface al usuario, ya que por medio de la herramienta, este puede añadirle gráficos, fotos, cambiar el tipo y estilo de fuente etc.

La interface con otros programas se realiza para acceder bases de datos y convertirlas en listas dinámicas y de esta manera correr el sistema con valores obtenidos de otros sistemas.

11.4.5 Subsistema de Explicación. El desarrollador tiene la opción de añadir un subsistema de explicación (Véase sección 9.4.5) el cual justifique al usuario la manera en que se hallo una respuesta específica o explicar el porqué, si no fue posible obtener una solución.

11.4.6 Subsistema de Aprendizaje. El aprendizaje (Véase 9.4.6) en la herramienta está a cargo del desarrollador, ya que para ampliar la base de conocimientos, es este quien debe tener nueva información proveniente del experto e ingresarla a la base de conocimientos.

12 METODOLOGIA PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO CON LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL SELECCIONADA.

12.1 PROTAGONISTAS

Los principales protagonistas en el desarrollo de un sistema experto convencional se pueden clasificar básicamente en desarrollador(es), experto(s), usuario(s) y administrador(es). A continuación se describirán los roles de cada uno de estos protagonistas en todo el ciclo de vida del sistema experto.

12.1.1 Desarrollador. El desarrollador o ingeniero de conocimiento es quien se encarga de:

- Ayudar al experto en la labor de explicar los conocimientos.
- Codificar los conocimientos en la representación en forma de reglas que utiliza la herramienta.
- Conocer las fortalezas y debilidades de la herramienta.
- Aprender las particularidades del dominio, tarea específica y del ambiente donde se utilizara el sistema experto.
- Analizar los procedimientos del experto.
- Detectar inconsistencias dentro de la lógica de solución de problemas.
- Refinar la base de conocimientos por medio de la realización de pruebas.

12.1.2 Experto. El experto es un protagonista principal en el desarrollo del sistema experto ya que entre sus tareas están:

- Proveer conocimiento del dominio y de la tarea específica.
- Explica sus métodos y conocimientos.

12.1.3 Usuario. El usuario es quien regularmente estar utilizando el sistema experto para resolver problemas. Se debe tener en cuenta que normalmente no es un experto en el dominio y por lo tanto utiliza el sistema como herramienta para la solución del problema específico.

12.1.4 Administración. La administración es la encargada de identificar problemas relacionados con el sistema, aprobar la realización o actualización del sistema y asignar los recursos necesarios para llevar a cabo esta labor.

12.2 METODOLOGIA

Para el desarrollo del sistema experto se debe implementar una metodología que exprese cual será la función principal desempeñada por el sistema y la cual preste ayuda en el proceso del diseño del sistema experto.

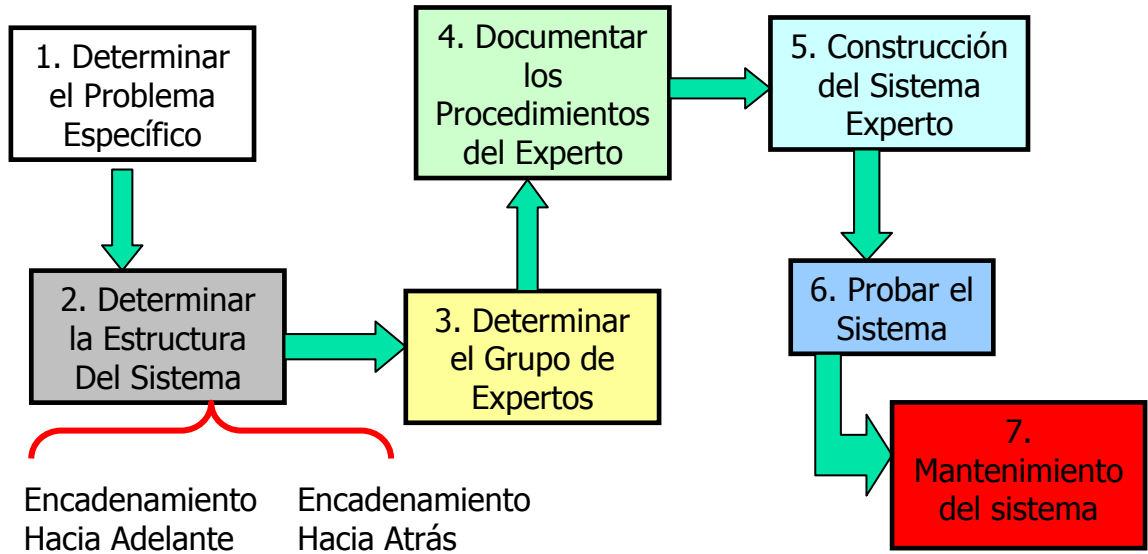
El desarrollo de un sistema experto en esta herramienta consta de varios pasos esenciales, los cuales son aplicables a casi la totalidad de los sistemas desarrollados en este programa.

Esta metodología se puede resumir básicamente en los siguientes 7 pasos:

1. Determinar el problema específico, centrado en lo que se hará en realidad.
2. Determinar la estructura del sistema.
3. Determinar el grupo de expertos.
4. Documentar de manera precisa los pasos realizados por el experto para resolver el problema.
5. Construcción del sistema experto.
6. Verificación del funcionamiento del sistema experto.
7. Mantenimiento del sistema experto.

A continuación se explicaran cada uno de los 7 pasos necesarios para el desarrollo de un sistema experto con la herramienta seleccionada. Véase Ilustración 23.

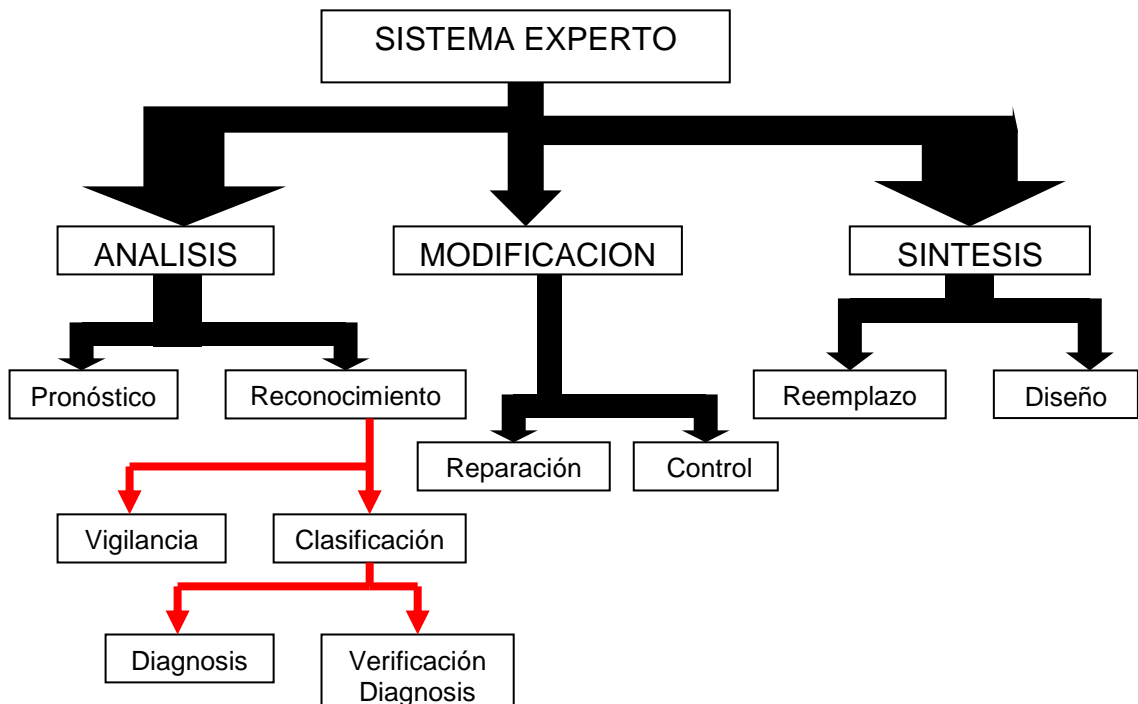
Ilustración 23. Diagrama Metodología para el desarrollo de sistemas expertos.



12.2.1 Determinar el problema específico. Mientras más específico sea el problema, más sencillo será el desarrollo del sistema. Es válido plantearse la pregunta ¿Puede el experto explicarle a otra persona como resolver el problema? Si la respuesta es sí, el problema puede ser desarrollado en un sistema experto. En este paso se debe realizar un análisis de la solución del problema por medio de un sistema experto. El primer paso es analizar los avances de los sistemas expertos y su aplicabilidad en mantenimiento de sistemas técnicos. Se debe analizar el sistema técnico desde tres puntos de vista (Véase Ilustración 24):

- El análisis: El cual comprende la evaluación del estado técnico del sistema.
- La modificación: La cual comprende el control de las condiciones de operación y programación de las actividades de manutención del sistema técnico.
- La síntesis: En la cual se establecen criterios de reemplazo y rediseño de componentes mecánicos del sistema técnico.

Ilustración 24. Aplicaciones de los sistemas expertos en el mantenimiento de sistemas técnicos.



De los protagonistas anteriormente mencionados, en este paso debe estar presente básicamente el desarrollador ya que es quien analiza la posibilidad de llegar a una solución por medio del desarrollo de un sistema experto. La administración debe estar parcialmente presente en este paso ya que esta recibe el informe del desarrollador y analiza la viabilidad y asigna recursos de ser factible el desarrollo del sistema.

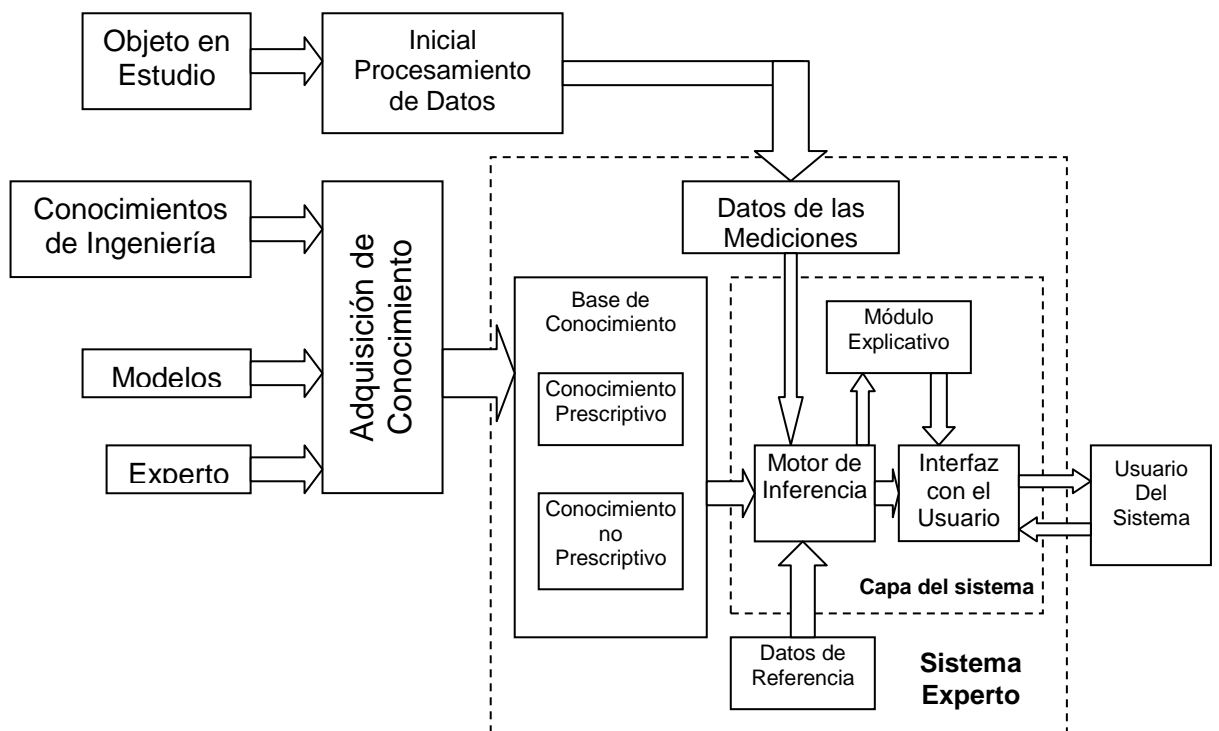
12.2.2 Determinar la estructura del sistema. Un sistema puede tener diferentes estructuras así como los problemas pueden tener varias formas de resolverse que serán igualmente correctas, por eso el sistema debe tener una estructura que cumpla con tres características:

- Producir resultados correctos.
- Tener sentido para el desarrollador.
- Ser fácil para otros de entender y mantener.

Para esto, el desarrollador debe escoger entre dos tipos de estructura encadenamiento hacia delante o hacia atrás. (Véase sección 11.3.3)

En el diseño de la arquitectura del sistema experto se deben diseñar los flujos de entrada y de salida. El modelo experimental de diagnóstico, información del sistema técnico (normas, teorías, técnicas) y el conocimiento técnico y empírico de los expertos en sistemas relacionados con el sistema técnico en cuestión, son los flujos de entrada del sistema experto y el flujo principal son los criterios de toma de decisiones para la planificación de actividades de mantenimiento preventivo y predictivo necesarias para el buen funcionamiento y sostenimiento de la vida útil de los componentes mecánicos.

Ilustración 25. Diseño de la arquitectura del sistema experto.



Este paso está a cargo básicamente del desarrollador, ya que este es el encargado de elegir una arquitectura que se adapte a las necesidades del problema específico.

12.2.3 Determinar el grupo de expertos. Elaboración del método para determinar el grupo de expertos en mantenimiento en el sistema técnico a tratar. Selección de los expertos en el sistema técnico desde el punto de vista del diseño, fabricación, operación y manutención.

Ilustración 26. Pasos Para Determinar los Expertos en Mantenimiento.



Aquí se selecciona un número inicial de especialistas en el tema y se seleccionan las personas que cumplan el perfil de la especialidad necesaria. De este grupo se seleccionarán las personas que tengan mejor conocimiento del tema y estos se denominarán expertos. Luego se realizarán una serie de preguntas y de aquí se seleccionara el grupo de expertos que tengan una opinión coherente.

Este paso debe estar a cargo tanto del desarrollador como de la administración, ya que se requieren varios criterios de selección por parte de varios evaluadores y estos son el desarrollador y la administración.

12.2.4 Documentar los Pasos Realizados por el Experto para Resolver el Problema. Los expertos realizan procedimientos para resolver un problema en un área específica, la documentación de estos procedimientos facilitará el desarrollo del sistema experto. Si toda la lógica está documentada, solo será cuestión de convertir esta lógica a la forma sintáctica que el programa utiliza. En este paso es donde se lleva a cabo la adquisición del conocimiento, extrayéndole información al experto por varios métodos previamente determinados.

12.2.4.1 Adquisición de Conocimientos. La etapa de la adquisición de conocimientos es una de las etapas principales para el desarrollo del sistema experto. En esta etapa están envueltos el experto, el desarrollador y la administración.

Hay varias maneras de adquirir conocimientos para implementarlos en la base de conocimientos del sistema experto, pero todas son con el mismo fin y es el de sacar la información que ha recopilado el experto a lo largo de los años ya sea a través de libros, estudios, conferencias o simplemente la experiencia.

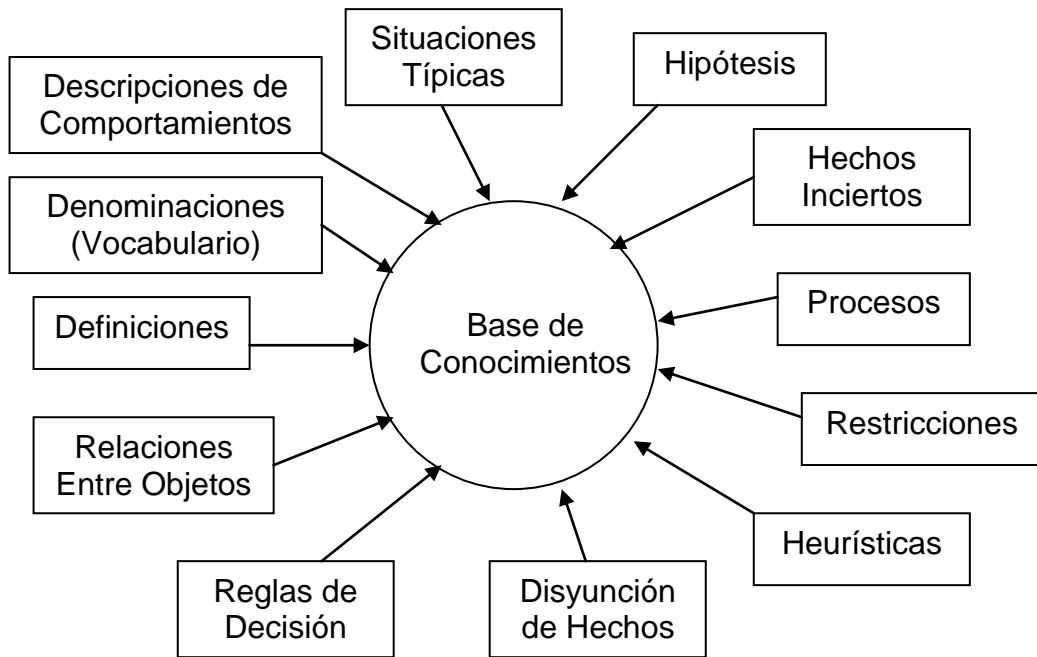
Los conocimientos a representar en el sistema experto se pueden presentar bajo diversas formas y se ilustran en la Ilustración 27.

Esta etapa puede ser muy compleja porque muchas veces puede ser difícil para el experto explicar los procedimientos mentales realizados para la toma de decisiones. Por este motivo las preguntas a realizar en las entrevistas y encuestas deben estar muy bien planteadas para entender hasta el detalle el porqué de las respuestas del experto.

La etapa de adquisición de conocimientos, se puede dividir en tres fases (Véase

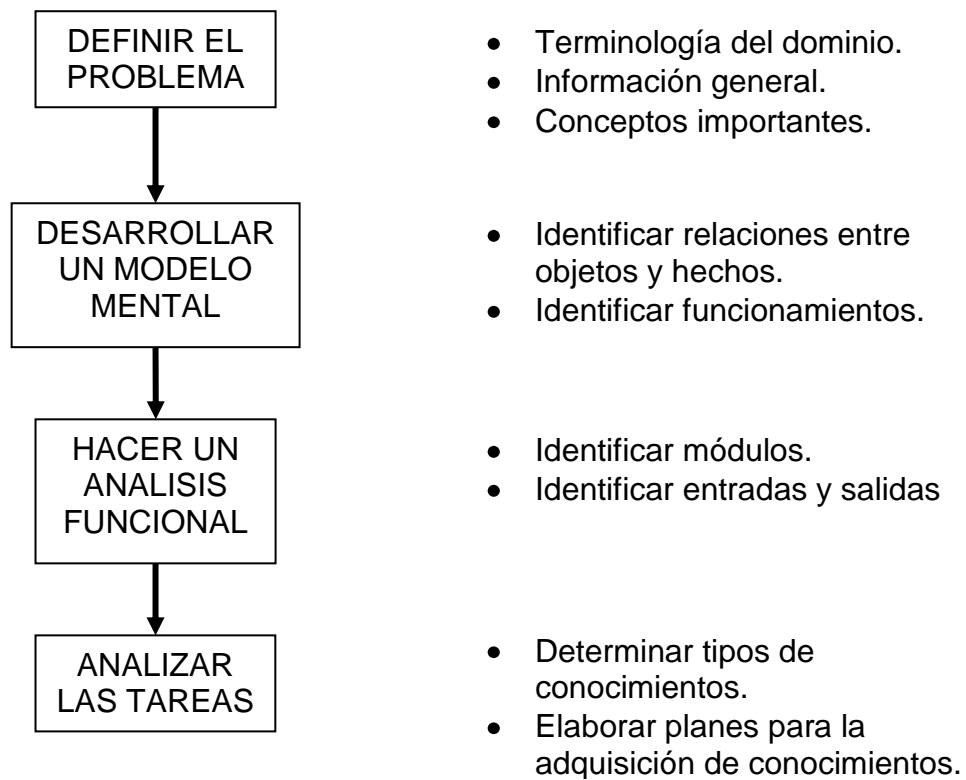
Ilustración 28, Ilustración 29 e Ilustración 30).

Ilustración 27. Tipos de Conocimientos del Experto.



RESTREPO, 1993, 58.

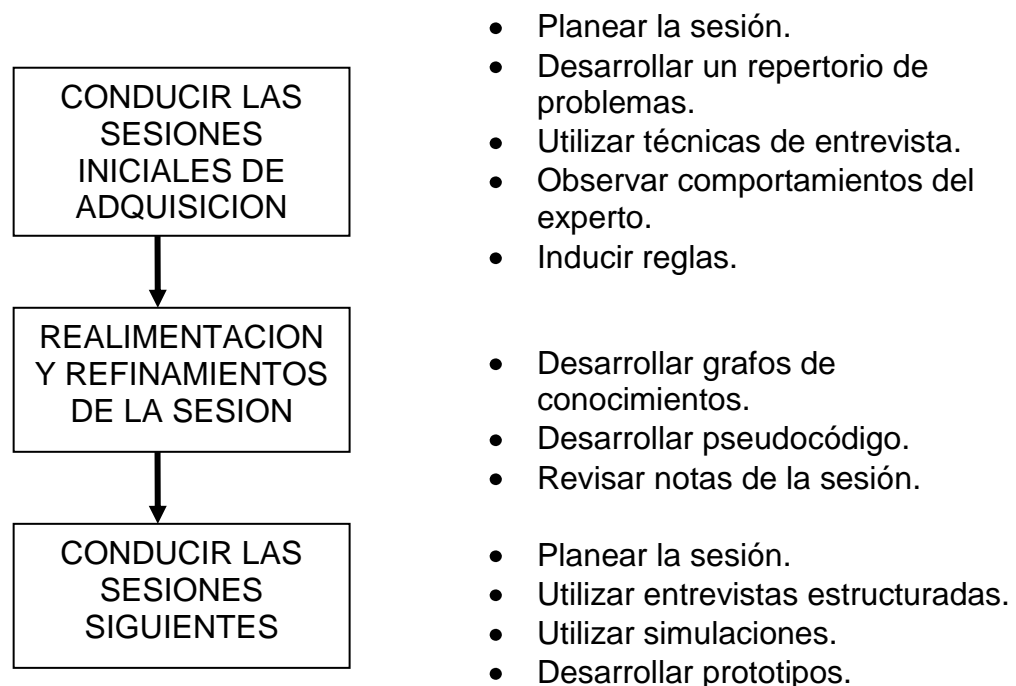
Ilustración 28. Fase 1 adquisición de conocimiento.



RESTREPO, 1993, 59

En la fase 1, un 80% depende del desarrollador y un 20% depende del experto. Esta fase se basa en la familiarización del desarrollador con el dominio, por lo tanto se debe manejar a nivel general, no entrando mucho en un terreno en específico. En esta primera fase se debe elaborar un glosario con los términos del dominio desconocidos por el desarrollador y se intercambian ideas entre los miembros del grupo.

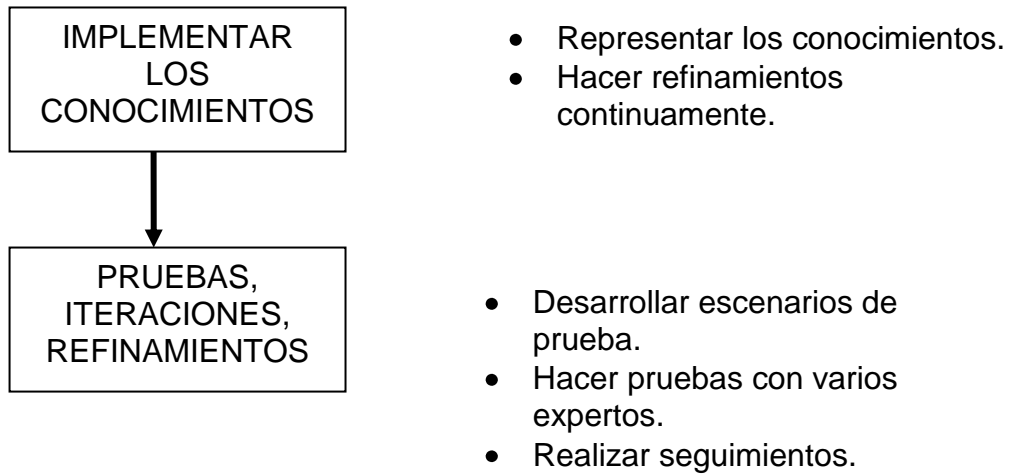
Ilustración 29. Fase 2 adquisición de conocimiento.



RESTREPO, 1993, 59.

Durante la etapa 2, la adquisición del conocimiento está repartida aproximadamente en un 50% entre el desarrollador y el experto.

Ilustración 30. Fase 3 adquisición de conocimiento.

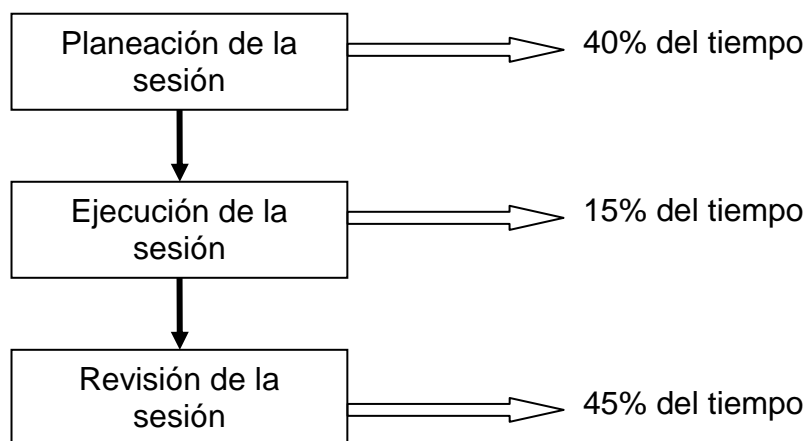


RESTREPO, 1993, 60.

En esta tercera fase el desarrollador es el encargado del 80% de la adquisición del conocimiento y el experto se encarga del 20%. Esto se debe a que esta tercera fase es básicamente la representación y refinamiento de los conocimientos previamente adquirido en fases anteriores.

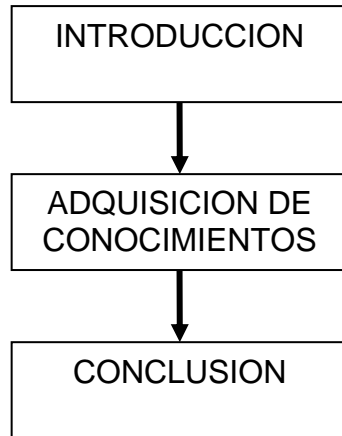
Para cada sesión de adquisición de conocimiento se debe seguir el siguiente esquema de preparación (Véase Ilustración 31):

Ilustración 31. Esquema de preparación de las sesiones.



Una sesión de adquisición de conocimiento tiene la siguiente estructura:

Ilustración 32. Esquema de las sesiones.



- Resumen de la sesión anterior (si la hubo).
- Presentación de la sesión actual: objetivo, técnicas, duración etc.
- Técnicas de adquisición de conocimientos.
- Resumen de la sesión.
- Repaso de los hallazgos.
- Solicitudes de aclaración.
- Solicitudes de extensión.
- Información sobre la sesión siguiente.

Las preguntas a realizarle al experto pueden ser de dos tipos abiertas o cerradas. Las abiertas, dan un mayor espacio al experto para explicar su respuesta mientras que las cerradas son básicamente de selección múltiple. A continuación se presentara un prototipo general de encuesta a realizar a los expertos.

- ¿Para qué tipo de máquina se desarrollara el sistema experto?
(Rotativa, lineal etc.)
- ¿Cuál es la marca de la máquina?
- ¿Cuál es la referencia de la máquina?
- ¿Esta codificada la máquina?
- ¿Utilizan codificación inteligente o bruta?
- ¿Cuál es el código de la máquina?
- ¿Cuál es la función principal de la máquina?
- ¿Cuáles son los principales sistemas de la máquina? (Eléctrico, Lubricación, Combustible, etc.)
- ¿Cuáles son los componentes básicos de la máquina?
- ¿Para qué sirve cada uno de los componentes?

- ¿Cuáles son los componentes críticos en el funcionamiento de la máquina?
- ¿De qué materiales están fabricados estos componentes?
- ¿Cuál es la criticidad de falla de cada uno de los componentes críticos?
- ¿Cuáles son los modos de falla de estos componentes?
- ¿De qué manera se pueden prevenir estas fallas?
- ¿con que variables se pueden monitorear estas fallas?
- ¿Cuáles son los elementos con mayor número histórico de fallas?
- ¿Cuál es el rango de operación de la máquina sugerido por el fabricante? (rpm, velocidad, etc.)
- ¿Cuál es el rango de operación real de la máquina?
- ¿Cómo pueden ser afectados los componentes con la variación en el rango de operaciones?
- ¿Cuál es el ambiente de operación de la máquina? (corrosivo, con polvo, etc.)
- ¿Está la máquina diseñada para este tipo de ambientes?
- ¿Se tiene documentación acerca de la operación de la máquina?
- ¿La máquina se opera bajo estos parámetros del fabricante?
- ¿Se tiene documentación acerca del mantenimiento de la máquina sugerido por el fabricante?
- ¿Se cumplen los planes de mantenimiento sugeridos por el fabricante?
- ¿Cuáles son los componentes consumibles de la máquina? (bandas, cadenas, filtros etc.)
- ¿Requiere lubricación la máquina?
- ¿Se utilizan los lubricantes y grasas sugeridos por el fabricante?
- ¿Qué tipo de mantenimiento se le realiza a la máquina? (preventivo, predictivo, correctivo, etc.)
- ¿Se tiene establecido un plan de mantenimiento para la máquina?
- ¿Cada cuanto se interviene la máquina?
- ¿Se tiene historial de las intervenciones hechas a la máquinas?

- ¿Quién realiza el mantenimiento de la máquina, personal propio o personal subcontratado?
- ¿Cuál es el tiempo de operación diaria de la máquina?
- ¿Cuál es la vida útil de la máquina?
- ¿Cuál es la edad de la máquina?
- ¿Se le ha realizado algún overhaul a la máquina?
- ¿Se le ha realizado alguna modificación a la máquina? ¿Por que?
- ¿Se tienen indicadores de mantenimiento para la máquina?
- ¿Cuál es el MTTR (tiempo medio de reparación) histórico de la máquina?
- ¿Cuál es el MTBF (tiempo medio entre fallas) histórico de la máquina?
- ¿Qué tipo de repuestos de la máquina se tienen en el almacén?
- ¿Están los repuestos clasificados por su criticidad?
- ¿Qué componentes de la máquina se van a monitorear para el sistema experto?
- ¿Qué variables se desean controlar para el sistema? (vibraciones, temperatura, etc.)
- ¿Cómo se van a tomar estas mediciones? (sensores, etc.)
- ¿Cada cuanto se tomaran estas mediciones?
- ¿Cuáles son los rangos normales de estas variables dependiendo del rango de operación?

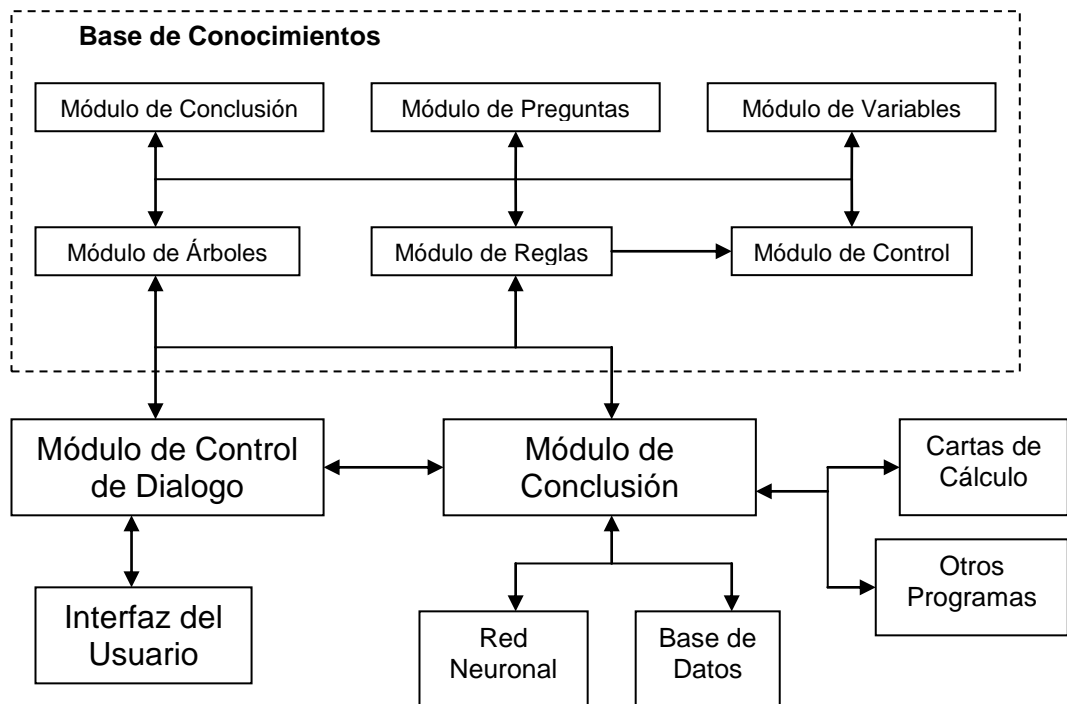
Una vez se tengan las respuestas a todas las preguntas, se puede iniciar con la etapa del desarrollo de la base de conocimientos, que es estructurar la información obtenida de las preguntas y traducirla a reglas que puedan ser utilizadas por el sistema.

Luego se debe hacer un proceso de refinamiento de las reglas para comprobar la calidad de la base de conocimientos.

12.2.5 Construcción del Sistema Experto. Construcción del sistema experto de mantenimiento preventivo y predictivo, con el fin de capturar el conocimiento del sistema técnico en cuestión y entregar respuestas alrededor del mantenimiento preventivo y predictivo.

En este paso se deben convertir los procedimientos utilizados para resolver el problema a la forma lógica de reglas If/Then utilizada por la herramienta. También se debe diseñar como será la interface al usuario, la cual no debe ser demasiado simple, ya que un programa puede tener mucha capacidad pero no ser agradable a la vista. Muchos desarrolladores prefieren lograr un programa con mucha capacidad pero con una interface sencilla para luego pulirla una vez el sistema este funcionando correctamente. Diseñar una buena interface desde el principio puede ayudar debido a que durante las pruebas del sistema también se podrá probar la interface.

Ilustración 33. Diagrama de construcción del sistema experto.

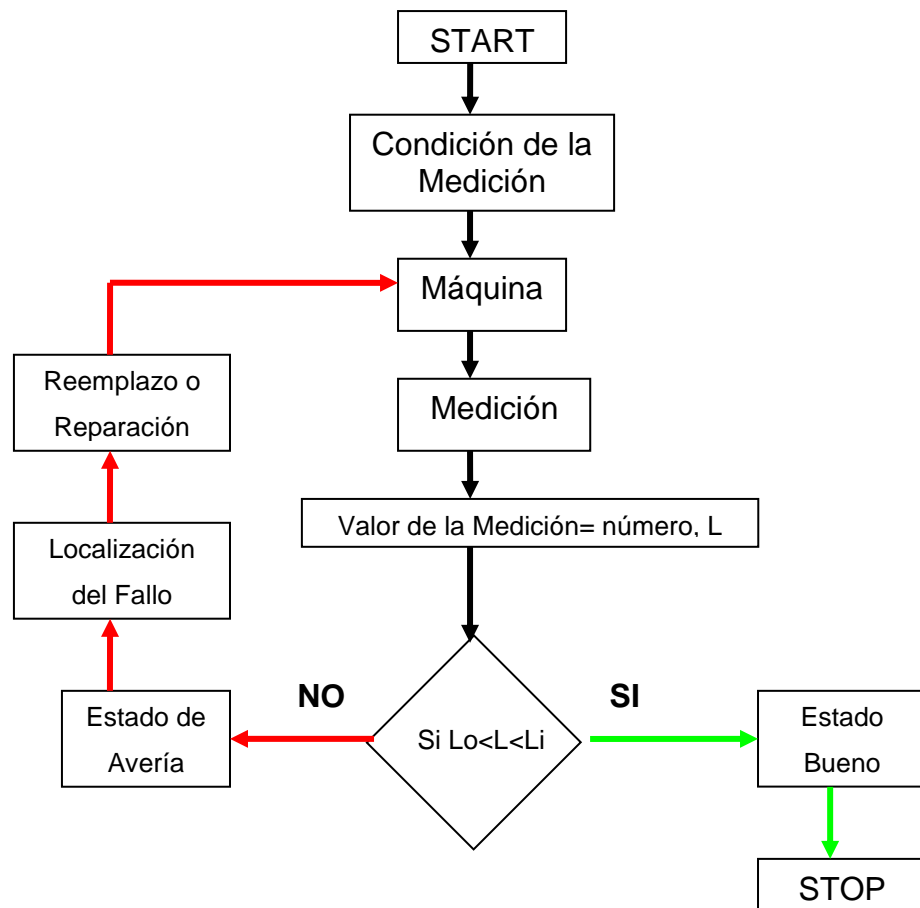


Este paso está a cargo principalmente del desarrollador, ya que allí su principal función es la de tomar la información adquirida del experto y traducirla en reglas que la herramienta pueda procesar.

12.2.6 Verificación del Sistema Experto. La última etapa de la investigación es la validación y puesta a punto del sistema experto de mantenimiento en condiciones reales.

El programa debe ser probado y validado por el experto para asegurar que los resultados que produce son correctos. El sistema puede ser probado individualmente a mano o se puede utilizar el programa de validación que posee la herramienta, el cual detecta errores en la lógica en un poco tiempo. Mientras más complejo sea el sistema, más tiempo tomara la validación.

Ilustración 34. Evaluación del sistema experto.

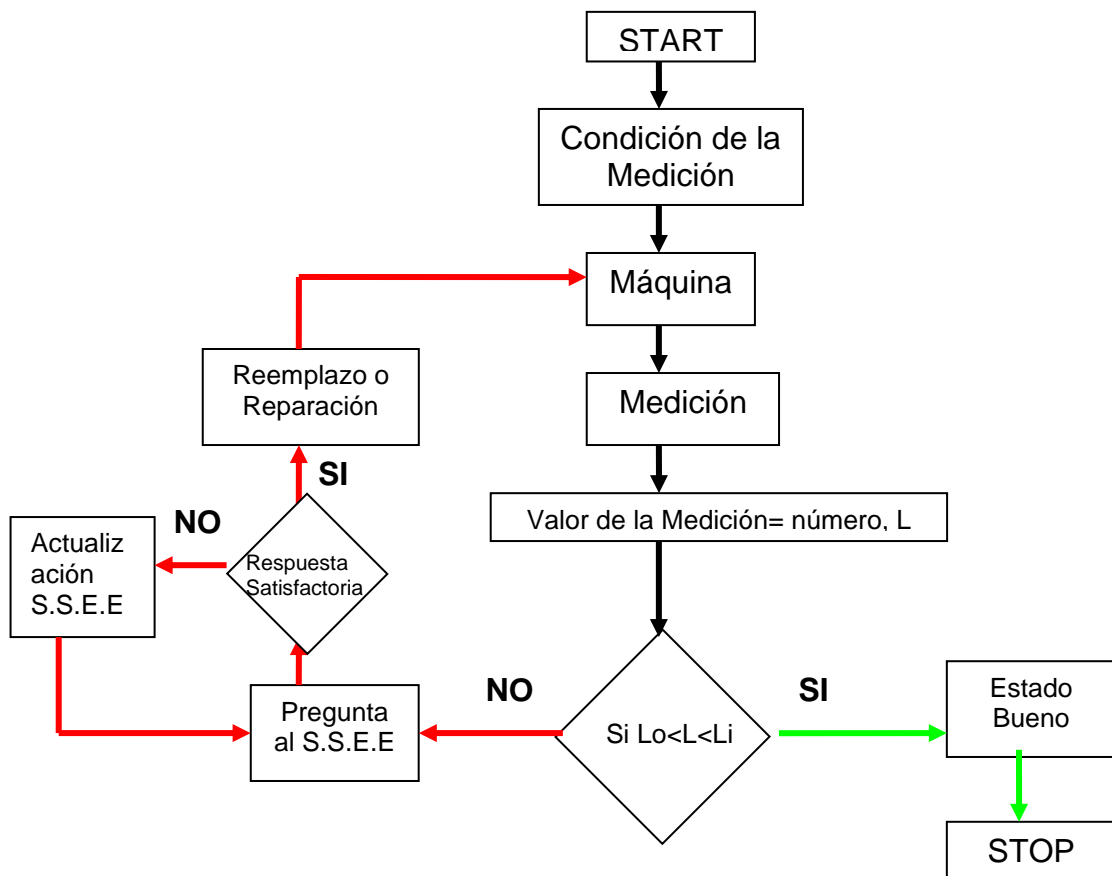


La verificación y validación debe estar a cargo del desarrollador conjuntamente con el experto. Esto se hace con el fin de probar que las respuestas entregadas por el sistema concuerdan con las dadas por el experto. En este punto luego de verificar que los resultados son correctos, se debe llevar el sistema al campo e

instalarlo en el lugar de uso para que el usuario final sea quien se encargue de sacarle provecho a toda la información contenida en la base de conocimientos y usarla como apoyo a la toma de decisiones.

12.2.7 Mantenimiento del Sistema Experto. El último paso es el mantenimiento del sistema experto debido a que con el uso diario se pueden ir descubriendo baches en la información que deben ser corregidos con el fin de tener un sistema más completo.

Ilustración 35. Mantenimiento del Sistema Experto



En la etapa del mantenimiento del sistema experto deben estar presentes todos los protagonistas del desarrollo. El usuario detecta la falla en el sistema al este no encontrar una respuesta en su base de conocimientos. El usuario le informa a la administración quien decide si se debe actualizar la base de conocimientos y contacta al experto y al desarrollador. Al ser un problema nuevo del sistema

que no tiene respuesta, se debe realizar una nueva adquisición de conocimientos del experto y el desarrollador traducirlo a reglas de la herramienta, para así ampliar la base de conocimientos y de esta manera el sistema puede estar en capacidad de generar mejores y mayor número de respuestas.

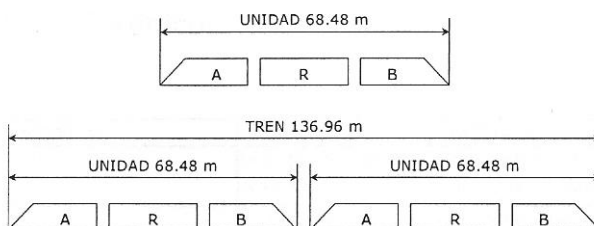
13 DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO APLICADO A UN SISTEMA FERROVIARIO

13.1 OBJETO DE ESTUDIO

El objeto de estudio de este trabajo es un vehículo ferroviario y su interacción rueda-riel.

La estructura de los coches de cada unidad está formada por dos coches motores en los extremos denominados “A” y “B”, con una construcción casi idéntica, los cuales cuentan con cabina para conductores; y un coche remolque “R” intermedio el cual no tiene accionamiento (MARIN, 2006, 8) (Véase Ilustración 36). Las características del vehículo se muestran en la Tabla 3.

Ilustración 36. Dimensiones generales del vehículo



Manual de mantenimiento Metro de Medellín.

Tabla 3. Características básicas de la unidad

Tipo	Vehículo bidireccional articulado
Bogie motor	4
Bogie portador	2
Ancho de vía	1435 mm
Altura del coche desde el riel al techo	3,8 m
Ancho exterior del coche	3,2 m
Longitud del coche sobre los enganches	22.860 (coche motor)
	22.760 (coche remolque)
Tensión de catenaria	1500 v.c.c +20%-30%
Tensión auxiliar	110 v.c.c batería
	3x220 V 60 hz. Convertidor
	3x440 V 60 hz. Convertidor

Tipo	Vehículo bidireccional articulado
Tracción	4 motores de tracción perpendiculares a ejes. Cada motor impulsa un eje de un bogie.
Potencia del motor	205 KW (permanente)
Razón de transmisión	5.95 : 1 = Z1/Z2 = 119/ 20 : 1
Diámetro de las ruedas	850 mm (nueva)
	800 mm (desgastada)
Velocidad máxima de servicio	80 Km/h

Manual de mantenimiento Metro de Medellín.

Para las cargas que aplican sobre el vehículo, se considera este vacío AW0, el vehículo con carga normal AW1 (5.5 per/m²) y el vehículo con carga máxima AW2 (8 per/m²) (Véase Tabla 4).

Tabla 4. Cargas de los coches y la unidad

Peso	Coche motor A	Coche motor B	Coche remolque	Unidad
Vacio AW0	42.640 Kg	41.980 Kg	28880 Kg	113.500 Kg
Carga AW1	61.425 Kg	60.765 Kg	48.900 Kg	171.090 Kg
Carga AW2	68.575 Kg	67.915 Kg	56.310 Kg	192.800 Kg

Manual de mantenimiento Metro de Medellín.

En la Tabla 5 se muestra el sistema de control con el que cuenta cada unidad.

Tabla 5. Sistema de control del vehículo

Nombre	Característica
Sistema de control	Mando de cuatro motores de tracción por choper. Arranque, marcha y frenado controlables.
Sistema de freno	Freno electrodinámico, recuperación de energía por resistencias. Frenos magnéticos de vía en cada bogie. Freno de parqueo por resortes. Freno electro neumático
Aceleración	0.95 m/s ² - carga normal (AW1=5.5 per/m ²). 0.85 m/s ² carga maxima (AW2= 8 per/m ²)

Nombre	Característica
Desaceleración de servicio	1.1 hasta 1.2 m/s ²
Desaceleración de emergencia	1.3 m/s ²
Desaceleración de emergencia excepcional	1.9 m/s ²
Radio mínimo de Curva	90 m

Manual de mantenimiento Metro de Medellín.

13.2 SISTEMAS DE LOS VEHICULOS PARA PASAJEROS

Los vehículos de pasajeros objeto de estudio, están compuestos por los siguientes sistemas:

Sistema de caja del vehículo: Es el compartimiento de pasajeros.

Sistema de bogies: Soportan los ejes y en algunos los motores; son intercambiables.

Sistema de aire comprimido: Es un sistema neumático en cada vehículo de pasajeros.

Sistema de tracción: Está compuesto por motores que accionan los ejes de un bogie.

Sistema de mando y control: Este sistema lo constituyen los diferentes elementos por los cuales se realiza la conducción del vehículo.

Sistemas auxiliares: Son los encargados de dar soporte a la marcha del vehículo.

Sistema de frenos: Está compuesto por circuitos eléctricos y mecánicos, los cuales dan el control del freno electro-neumático.

Sistema de puertas: Está compuesto por 8 puertas por coche, 4 puertas por cada lado, las cuales abren según el tipo de plataforma (central o lateral).

Sistema de alumbrado: Se compone del alumbrado interior y el alumbrado exterior. Está compuesto por luces internas y faros frontales del vehículo.

Sistema de radio: Se compone de comunicación al interior del vehículo y con el puesto central de control.

Sistema de control automático del tren: Es el que permite la marcha segura del vehículo en los diferentes modos de operación.

Sistema de enganches de los vehículos: Es el que permite el acople eléctrico y mecánico de los trenes.

Sistemas neumáticos auxiliares: Son todos los equipos neumáticos diferentes al equipo de freno y suministro de aire (MARIN, 2006, 10).

13.3 DESCRIPCION DEL SISTEMA DE VIA PERMANENTE

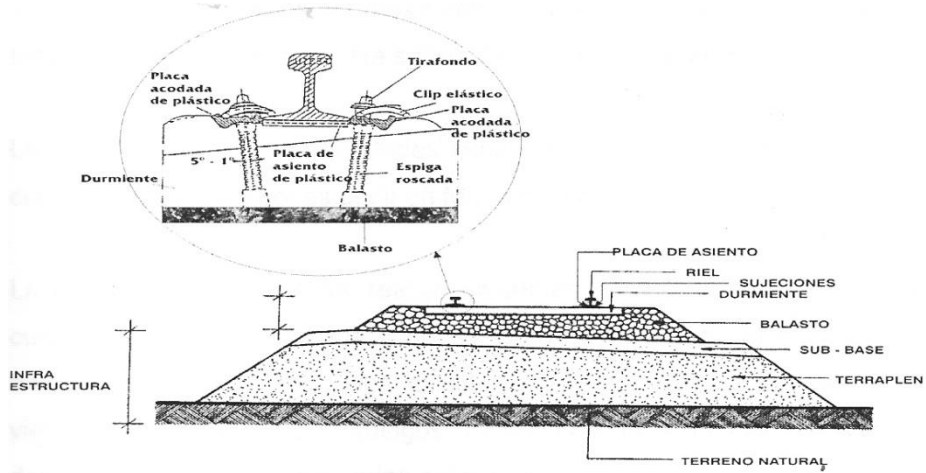
El Metro de Medellín cuenta con un sistema de 75 km. de vía férrea distribuidos de la siguiente forma:

- 13.5 km en el Patio de Bello.
- 3.5 km en la línea de enlace.
- 5.59 km en la línea B descendente.
- 5.59 km en la línea B ascendente.
- 23.41 km en la línea A descendente.
- 23.41 km en la línea A ascendente.

En las vías del sistema Metro de Medellín, pueden funcionar tanto vehículos de pasajeros como vehículos auxiliares para el mantenimiento. El recorrido de estos vehículos de pasajeros se realiza en una sola dirección, mientras que el movimiento de los vehículos auxiliares se puede realizar en ambos sentidos.

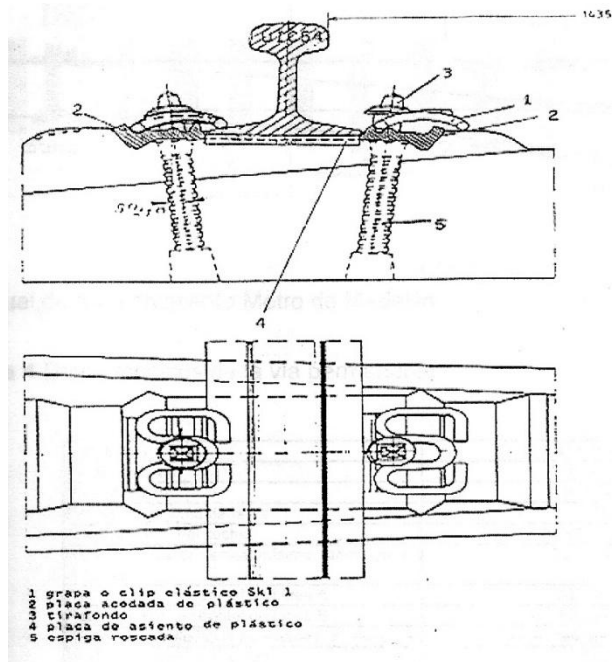
En general, la vía del Metro de Medellín está compuesta por tramos de vía continuamente soldada, unidos por otros equipos llamados cambiavías, cuya función es permitir a los vehículos pasar de una vía a otra. En la vía comercial se tiene un total de 67 cambiavías, estratégicamente ubicados en las líneas A y B, lo cual permite operar el sistema por tramos intermedios (MARIN, 2006, 13). En la Ilustración 37 y en la Ilustración 38 se muestran los esquemas generales de la vía y sus formas de sujeción. En la Ilustración 39 se muestra el esquema de un cambiavías. Para información técnica sobre la vía véase la Tabla 6. Datos técnicos de la vía permanente.

Ilustración 37. Esquema general de la superestructura de la vía



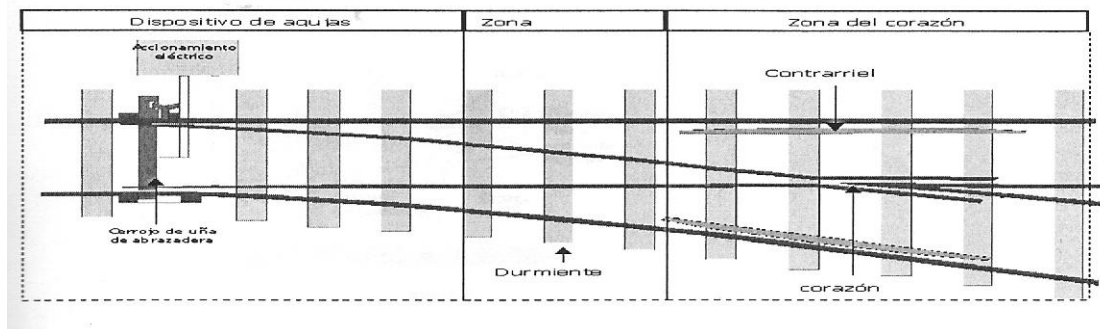
Manual de mantenimiento Metro de Medellín.

Ilustración 38. Configuración típica de la vía



Manual de mantenimiento Metro de Medellín.

Ilustración 39. Esquema de un cambiavías



Manual de mantenimiento Metro de Medellín.

Tabla 6. Datos técnicos de la vía permanente

Dato	Valor
Ancho de vía	1.435 mm
Peralte máximo	150 mm
Peralte mínimo	20 mm
Pendiente máxima de la vía	37 0/00
Ancho exterior del coche	3.200 mm
Radio de acuerdo vertical mínimo (admisible en el trayecto)	2.000 m
Radio mínimo horizontal en la Línea A	300 m
Radio mínimo horizontal en la Línea B	200 m
Radio mínimo en la vía de enlace	90 m
Distancia mínima entre vías	3,75 m
Distancia entre durmientes Línea	0,63 m
Distancia entre durmientes Patio Bello	0,75 m
Altura mínima del balasto sobre la sub-base	0,3 m
Hombro del balasto	0,4 m
Riel	UIC 54
Durmiente de hormigón	Tipo Dywidag
Longitud durmiente de hormigón	2,50 m
Tipo de sujeción	HM (Vossloh)
Finales de vía	Parachoques
Cambiavía	UIC 54 190 1:9
Cambiavías en Patio Bello	UIC 54 190/90 1:6
Velocidad máxima en Patio Bello	20 Km/h
Velocidad máxima en línea comercial	80 Km/h
Longitud de curvas (R<200m)	643,5 m
Longitud de curvas (200m<R<350m)	9.695,6 m

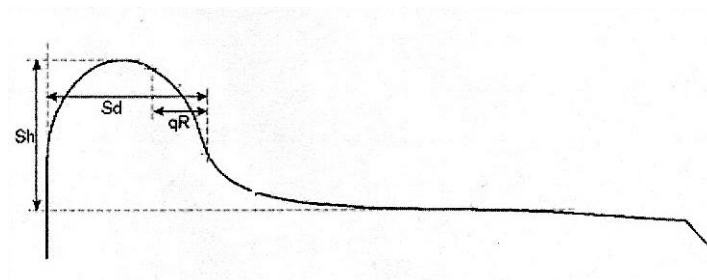
Longitud de curvas (350m<R<600m)	7.546,9 m
Dato	Valor
Longitud de curvas (600m<R<1000m)	2.615,5 m
Longitud de curvas (R>1000m)	956,7 m
Porcentaje de curvas en el sistema	43%

Manual de mantenimiento Metro de Medellín.

13.4 DESCRIPCION DE LAS RUEDAS

Las ruedas son la parte fundamental que hace contacto con el riel para así producir la interacción rueda-riel. La superficie de la rueda que interactúa con el riel, se denomina perfil de rueda. En la Ilustración 40 se muestran los parámetros de las ruedas.

Ilustración 40. Parámetros del perfil de rueda



Manual de mantenimiento Metro de Medellín.

Donde Sd es el espesor de la pestaña de la rueda; Qr es la escarpadura de la pestaña de la rueda; Sh es la altura de la pestaña de la rueda.

Para hallar el ángulo de la pestaña δ , se toman los valores medidos de Sh y Qr y se toma la tangente inversa como se aprecia en la Ecuación 10.

Ecuación 10. Ángulo de la pestaña de la rueda

$$\tan^{-1}\left(\frac{Sh}{Qr}\right) = \delta$$

Estos parámetros son independientes del perfil de rueda que se utilice.

Los parámetros de la rueda que se deben controlar son los siguientes:

Diferencia de diámetro: Se pretende que en dos ruedas de un mismo eje, se mantenga la menor diferencia de diámetro. La diferencia máxima permisible entre ruedas de un mismo eje son: 0.3 mm en estado nuevo y 0.5 mm en servicio admisible.

Ovalizacion: Es la perdida de circularidad de las ruedas. La diferencia máxima admisible entre ruedas de un mismo eje son: 0.3 mm en estado nuevo y 1 mm en servicio admisible.

Desviación frontal: Es la pérdida de perpendicularidad de la rueda respecto al eje donde se encuentre montada. Esta medida se garantiza desde el montaje de la rueda. La diferencia máxima admisible por rueda es de 0.5 mm.

Desviación concéntrica de la rueda (excentricidad): Es la pérdida del centro de la rueda respecto al eje donde está montada. Normalmente esta medida se garantiza desde la fabricación y el maquinado, conservando las referencias y tolerancias de rueda y eje. La diferencia máxima admisible por cada rueda es de hasta 0.3 mm.

Desviación de la forma de la pestaña: Es la pérdida de la forma de la pestaña de la rueda. La diferencia máxima admisible por cada rueda es de hasta 0.5 mm.

Desviación de forma en la banda de rodadura: Es la pérdida de la forma de la superficie de rodadura de la rueda. La diferencia máxima permisible por cada rueda es de hasta 0.5 mm.

Diferencias admisibles en los diámetros: Los siguientes son los criterios de aceptación en las diferencias en los diámetros (MARIN, 2006, 21).

Ruedas de un eje montado	0.3 mm
Ejes montados en un bogie	0.3 mm
Bogies de un mismo coche	3 mm
Coches de una unidad	20 mm

13.5 FUERZAS DE INTERACCION RUEDA-RIEL

Estas fuerzas pueden ser de tres tipos: verticales, axiales y longitudinales, y estas a su vez se pueden clasificar como cuasi-estáticas y dinámicas. Las

fuerzas cuasi-estáticas pueden ser causadas por: la carga del vehículo; fuerzas centrífugas en curvas, transiciones y cambiavías; vientos cruzados.

Las fuerzas dinámicas pueden ser debidas a: irregularidades verticales y horizontales en pista; irregularidades en la rigidez de la vía debido a variabilidades en el balasto; discontinuidades en soldaduras y uniones; defectos en el vehículo como planitudes en ruedas y vibraciones naturales.

Adicionalmente los efectos de la temperatura en la vía pueden causar fuerzas considerables a tensión y compresión que pueden resultar en pandeo del riel (ESVELD, 2001, 57).

13.5.1 Fuerzas Verticales. La fuerza vertical sobre el riel es causada por los siguientes componentes (Véase Ilustración 41):

Ecuación 11. Fuerza vertical sobre el riel

$$Q_{\text{Tot}} = (Q_{\text{estat}} + Q_{\text{cent}} + Q_{\text{viento}}) + Q_{\text{din}}$$

Donde:

Q_{estat} : Carga estática de la rueda (1/2 de la carga estática por eje)

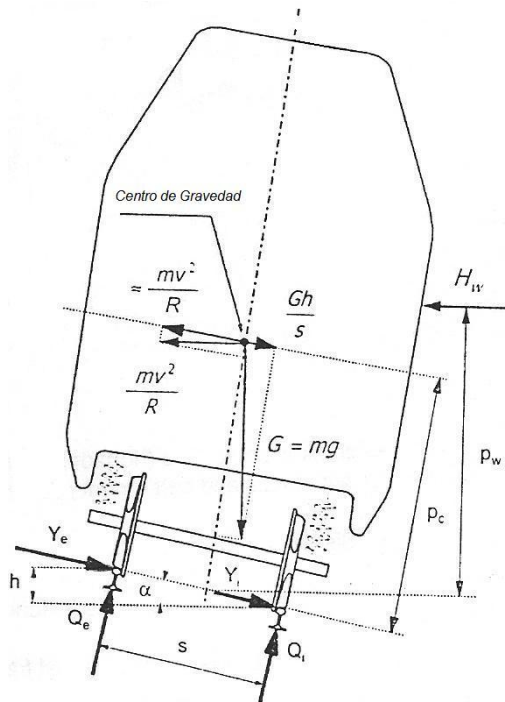
Q_{cent} : Incremento de carga en el riel exterior debido a curvas. Qe en la Ilustración 41.

Q_{viento} : Incremento de la carga estática en el riel contrario a la aplicación de la fuerza debido a vientos cruzados.

Q_{din} = Carga dinámica causada por: masas suspendidas, masas no suspendidas, corrugaciones en la vía, soldaduras y planitud en las ruedas.

Del equilibrio de fuerzas que actúan sobre el vehículo (Véase Ilustración 41), se puede deducir la siguiente fórmula para cada rueda en un pequeño Angulo de peralte (ESVELD, 2001, 58).

Ilustración 41. Fuerzas cuasi-estáticas del vehículo en una curva



ESVELD, 2001, 58.

Ecuación 12. Fuerzas verticales estáticas y centrífugas sobre el vehículo

$$Q_{\text{estat}} + Q_{\text{cent}} = G \frac{P_c \cdot h_d}{s^2} + H_w \frac{P_w}{s}$$

Donde h_d es la deficiencia de peralte calculada con la siguiente fórmula:

Ecuación 13. Deficiencia de peralte

$$h_d = \frac{s \cdot v^2}{g \cdot R} - h$$

Donde G es el peso del vehículo por juego de ruedas; H_w es la fuerza puntual ejercida por el viento cruzado, s es el ancho de la pista; v es la velocidad; g es la aceleración de la gravedad; R es el radio de la curva; h es el peralte; P_c es la distancia al centro de gravedad; P_w es la distancia de la fuerza resultante lateral del viento (ESVELD, 2001, 58).

13.5.2 Fuerzas Axiales. La fuerza lateral total de la rueda tiene varios componentes (Véase Ilustración 41). En la Ecuación 14 se aprecian estos componentes.

Ecuación 14. Fuerzas axiales

$$Y_{\text{tot}} = (Y_{\text{pestaña}} + Y_{\text{cent}} + Y_{\text{viento}}) + Y_{\text{din}}$$

Donde:

$Y_{\text{pestaña}}$ = Fuerza lateral ejercida por la pestaña de la rueda en el riel exterior. Y_e según Ilustración 41

Y_{cent} = Componente lateral de la fuerza centrífuga.

Y_{viento} = Componente lateral de la fuerza ejercida por los vientos cruzados.

Y_{din} = Componente lateral de la fuerza dinámica; en vía tangente es primordialmente debido al fenómeno de hunting⁷.

Si se asume que Y_{cent} y Y_{viento} actual totalmente en el riel exterior, del equilibrio de fuerzas por juego de ruedas considerado en la Ilustración 41 se obtiene:

Ecuación 15. Fuerza lateral máxima

$$Y_{e_Max} = G \frac{hd}{s} + Hw$$

La fuerza lateral en la vía Y , se puede asumir como la suma de todas las fuerzas Y , multiplicadas por un factor de amplificación debido a fuerzas dinámicas.

Ecuación 16. Fuerza lateral multiplicada por el factor de amplificación dinámico

$$Y = DAF * (G \frac{hd}{s} + Hw)$$

Donde DAF es el factor de amplificación debido a fuerzas dinámicas (ESVELD, 2001, 60).

⁷ Fenómeno de hunting: Movimiento oscilatorio de un vehículo ferroviario causada por la conicidad de las ruedas, donde se ve afectada la estabilidad direccional.

13.5.3 Fuerzas Longitudinales. Las fuerzas longitudinales ejercidas sobre la pista son el resultado de:

- Fuerzas por temperatura.
- Acelerado y frenado.
- Encogimiento del riel causado por soldaduras.
- Desplazamientos de la pista.

Las fuerzas en la pista causadas por la temperatura se pueden considerar estáticas, y son resultado del cambio de longitud del riel, el cual se puede calcular con la siguiente fórmula:

Ecuación 17. Incremento en longitud de riel

$$\Delta l = \alpha \cdot l_i \cdot \Delta t$$

Donde Δl es el cambio en la longitud del riel; α es el coeficiente de expansión del material del riel; Δt es el cambio en la temperatura ($\Delta t = t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}}$).

Las fuerzas por los desplazamientos de la vía son debidas al movimiento relativo del riel respecto a los durmientes, o del riel y los durmientes respecto al balasto. En una pista con vehículos en movimiento en ambas direcciones, el movimiento de la vía es menor.

Las cargas por aceleración y frenado en la vía, deben ser tomadas en cuenta al dimensionar la estructura. Para la mayor parte de los diseños, se toma esta fuerza como un 25% del peso del vehículo (ESVELD, 2001, 62).

13.5.4 Otras Fuerzas. El incremento en la velocidad y el peso del vehículo, también tiene una gran influencia al determinar las fuerzas dinámicas sobre la pista, ya que estas dependen en mayor parte de la velocidad, peso y condiciones de la pista. Un incremento en la velocidad o peso del vehículo, genera fuerzas dinámicas más altas lo cual se traduce en mayores costos de mantenimiento.

Las planitudes en las ruedas, son quizás las que generan las más altas fuerzas dinámicas en la pista, ya que estas planitudes ejercen la misma fuerza aleatoriamente sobre la pista, lo cual puede desencadenarse en daños por

fatiga. Estas fuerzas dependen en su mayoría de la velocidad del vehículo y de la profundidad de la planitud.

Otras fuerzas importantes que se pueden generar en la pista son debidas a malas soldaduras. Aun pequeñas desviaciones verticales en la geometría de la soldadura pueden ocasionar grandes fuerzas dinámicas al paso de la rueda (ESVELD, 2001, 68).

13.6 INDICE Y CRITERIOS DE SEGURIDAD EN MARCHA VEHICULOS FERROVIARIOS

Los descarrilamientos debidos a la pérdida de la guía lateral en la interface rueda-riel, se pueden clasificar en cuatro causas principales: escalamiento de la pestaña de la rueda, ampliación en el ancho de la pista, deflexión lateral del riel y movimiento lateral del riel (IWNICKI, 2006, 212). Para efectos de este trabajo, solo se consideraran los descarrilamientos por escalamiento de pestaña, ya que estos son los directamente relacionados con la interface rueda riel, los otros son debidos a las condiciones de la pista.

13.6.1 Escalamiento de Pestaña. Los descarrilamientos de escalamientos de pestaña son causados por el escalamiento de la rueda sobre el riel, para luego seguir moviéndose por encima del riel. Estos descarrilamientos generalmente ocurren cuando la rueda experimenta una alta fuerza lateral en combinación con situaciones donde la fuerza vertical sobre la pestaña es reducida. Las altas fuerzas laterales son inducidas usualmente por un alto ángulo de ataque de las ruedas. La fuerza vertical sobre la pestaña puede ser reducida significativamente en bogies que experimentan mala ecualización de la fuerza vertical en situaciones como pistas defectuosas, curvas, o cuando el vehículo experimenta resonancias al rodar.

El escalamiento de pestaña generalmente ocurre en curvas. Las ruedas en el riel exterior, experimentan una relación de fuerzas laterales a verticales (Y/Q) la cual esta principalmente relacionada con:

- Radio de la curva.
- Perfiles de la rueda y el riel.

- Características de la suspensión del bogie.
- Velocidad del vehículo.

Estos factores se combinan para generar un ángulo de ataque, el cual genera una fuerza lateral en curvas.

Un bogie desalineado (nivel de alineación por fuera del rango admisible) tiende a inducir mayores ángulos de ataque. Además, cualquier irregularidad o discontinuidad dinámica en la pista pueden influir en un incremento adicional de la relación Y/Q en la rueda. Cuando esta relación (Y/Q) excede el límite que la rueda puede sostener, ocurre el escalamiento de pestaña.

Descarrilamientos por escalamiento de pestaña, pueden presentarse sobre pistas tangentes cuando las irregularidades en la pista o el movimiento dinámico lateral del vehículo son severos, tal como en el fenómeno de cacería del vehículo o en frenados agresivos (IWNICKI, 2006, 212).

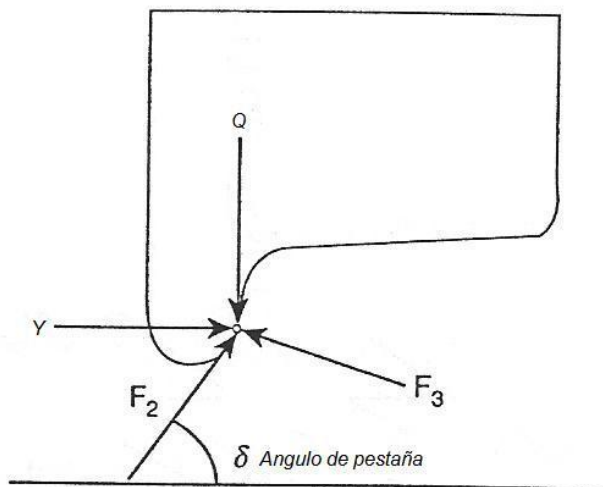
13.6.2 Criterios de Seguridad para el Escalamiento de Pestaña. El descarrilamiento producido por el escalamiento de la pestaña de la rueda ha sido investigado alrededor del mundo por acerca de 100 años. Varios criterios de seguridad han sido propuestos, los cuales han sido aplicados por ingenieros como guía para certificaciones de seguridad en pruebas de vehículos (IWNICKI, 2006, 214). Los siguientes son los criterios publicados más comunes:

- Criterio de límite Y/Q para una rueda de Nadal.
- Criterio de límite de la suma de Y/Q de todos los ejes de Weinstock.
- Distancia límite para vehículos de pasajeros a alta velocidad.
- Tiempo límite de 50 milisegundos.
- Criterio de duración en tiempo de Y/Q. Japanese National Railways (JNR).
- Criterio de duración en tiempo de Y/Q. Electromotive Division of General Motors (EMD).
- Criterio de distancia de escalamiento de la rueda. Transportation Technology Centre, Inc (TTCI).

Los criterios de Nadal y Weinstock están relacionados con el límite de la relación Y/Q. El resto de criterios están relacionados con límites de duración, ya sean de tiempo o distancia, los cuales son aplicados a limitar la duración en que es excedida la relación Y/Q. El escalamiento de rueda es propenso a ocurrir si ambos criterios, de límite de Y/Q y de duración son excedidos. A continuación se describirán brevemente los criterios de Nadal y Weinstock, ya que los otros criterios, son básicamente variaciones de los primeros.

13.6.2.1 Criterio de límite Y/Q para una rueda de Nadal. Nadal estableció la fórmula original para limitar la relación Y/Q para disminuir el riesgo de descarrilamiento (IWNICKI, 2006, 214). Esta fórmula se deduce a partir de un equilibrio de fuerzas en el punto de contacto de la pestaña (Véase Ilustración 42).

Ilustración 42. Fuerzas en el punto de contacto de la pestaña



IWNICKI, 2006, 213

Ecuación 18. Fuerza normal en el área de contacto

$$F_3 = Q \cos \delta + Y \sin \delta = Q \left(\cos \delta + \frac{Y}{Q} \sin \delta \right)$$

Ecuación 19. Fuerza tangencial en el área de contacto

$$F_2 = Q \sin \delta - Y \cos \delta = Q \left(\sin \delta - \frac{Y}{Q} \cos \delta \right) \dots \text{cuando } \dots (Q \sin \delta - Y \cos \delta) < \mu F_3$$

$$F_2 = \mu F_3 \dots \text{cuando } \dots (Q \sin \delta - Y \cos \delta) \geq \mu F_3$$

De la Ecuación 18 y la Ecuación 19, la relación Y/Q se puede expresar:

Ecuación 20. Relación de fuerza lateral y fuerza vertical

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\tan \delta - \frac{F_2}{F_3}}{1 + \frac{F_2}{F_3} \tan \delta}$$

El criterio de Y/Q limite dado en la Ecuación 20, se propone para la condición de saturación $F_2/F_3 = \mu$, de donde se obtiene la siguiente ecuación:

Ecuación 21. Relación Y/Q con $F_2/F_3 = \mu$

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\tan \delta - \mu}{1 + \mu \tan \delta}$$

Si se usa el ángulo máximo de contacto, esta ecuación da la relación mínima Y/Q a la cual ocurriría el descarrilamiento para este ángulo y un coeficiente de fricción μ . En otras palabras, por debajo de este valor, no ocurrirá descarrilamiento por escalamiento de pestaña (IWNICKI, 2006, 215).

Analizando la Ecuación 21 se puede deducir que mientras mayor sea el ángulo de contacto o menor sea el coeficiente de fricción, mayor será el límite Y/Q para que ocurra descarrilamiento por escalamiento de rueda. El criterio de Nadal asume que el descarrilamiento ocurre instantáneamente se supera el límite de la relación Y/Q.

13.6.2.2 Criterio de Límite de la Suma de Y/Q de Todos los Ejes de Weinstock. Este criterio predice descarrilamientos sumando los valores absolutos de Y/Q de las dos ruedas en un mismo eje. La relación Y/Q en la rueda de escalamiento es evaluada usando la ecuación de Nadal, mientras que la relación Y/Q en la otra rueda es utilizada para representar el coeficiente de

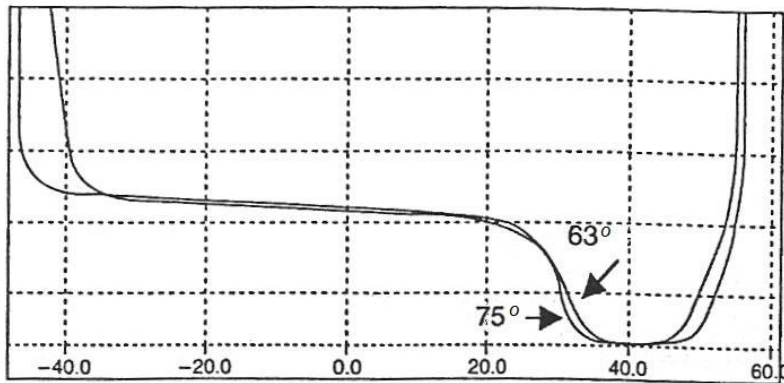
fricción en la interface rueda-riel debido a que esta rueda hace contacto con el riel en un bajo ángulo. Weinstock sugiere que la suma de todas las relaciones Y/Q en la rueda de escalamiento y el coeficiente de fricción en la otra rueda provee un criterio más acertado que el de Nadal. Si el coeficiente de fricción en la otra rueda tiende a cero, este criterio converge al criterio de Nadal, ya que no habrá contribución del valor Y/Q de la otra rueda. Estudios realizados muestran que a medida que aumenta el coeficiente de fricción en la otra rueda, el límite Y/Q en la rueda de escalamiento será mayor (IWNICKI, 2006, 217).

13.6.2.3 Criterio de Chartet. Un refinamiento práctico de la teoría de Nadal ha sido publicado por Chartet. Para analizar las fuerzas en equilibrio, en el momento inicial del descarrilamiento, Chartet considera la fuerza de diseño en la rueda que no descarrila del mismo eje, además de la rueda que descarrila. El encontró que independientemente del aseguramiento, que el coeficiente de descarrilamiento continúa con el límite del valor Q , no debería caer debajo de cierto mínimo valor. Este valor es 40% de la carga nominal de la rueda, donde la carga nominal de rueda es la mitad de la carga del eje, en otras palabras la rueda descargada no debería ser mayor al 60%.

13.6.3 Aplicación de los Criterios de Seguridad para el Escalamiento de Pestaña

Escalamiento de Pestaña Debido a Bajos Ángulos de Pestaña. La Ilustración 43 muestra dos ejemplos de ángulos de pestaña. Una es una rueda con un ángulo de pestaña de 75° y la otra tiene un ángulo de pestaña de 63° . Si se analiza el criterio de Nadal para estos dos ángulos y un coeficiente de fricción constante, se puede ver que el criterio de Nadal es más alto para el ángulo de 75° , por lo tanto se deduce que para ángulos mayores, el riesgo de descarrilamiento es menor (IWNICKI, 2006, 220).

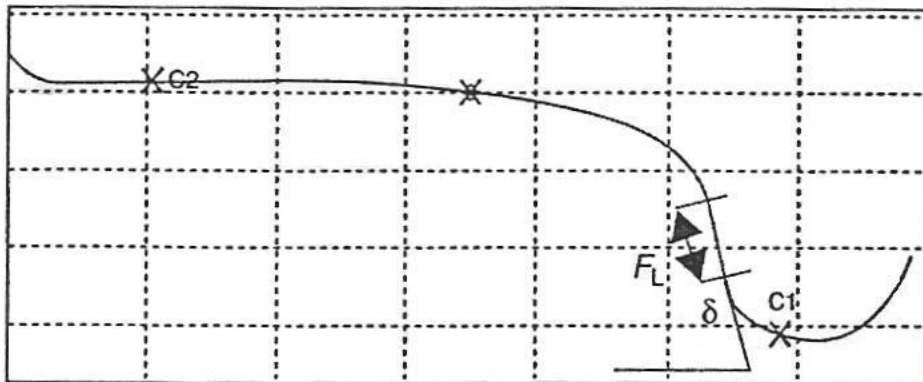
Ilustración 43. Ruedas con ángulos de pestaña de 63° y 75°



IWNICKI, 2006, 220.

13.6.3.1 Incremento en la Longitud de la Pestaña. La longitud de pestaña F_l está definida como la medida del contorno de la pestaña de una rueda a un ángulo de pestaña dado (Véase Ilustración 44). Simulaciones y pruebas en pista, han demostrado que el incremento en la longitud de la pestaña, puede aumentar considerablemente la distancia de descarrilamiento en un ángulo de ataque bajo y causar un pequeño aumento en esta distancia en un alto ángulo de ataque.

Ilustración 44. Longitud de Pestaña



IWNICKI, 2006, 221.

13.6.3.2 Escalamiento de Pestaña Debido a Altos Coeficientes de Fricción. Descarrilamientos por escalamiento de pestaña se han reportado en curvas de patios de mantenimiento en vehículos cuyas ruedas acaban de salir de la

máquina rectificadora y perfiladora. Este tipo de descarrilamiento es producido por la alta rugosidad de la superficie de la rueda cuando acaba de salir de rectificación ya que esto supone coeficientes de fricción más elevados. Al tener coeficientes de fricción mas elevados en la interface rueda riel, la relación limite Y/Q es menor lo cual aumenta el riesgo de descarrilamientos. Soluciones para este caso pueden ser el suavizado de la superficie de la rueda al salir de rectificado o la lubricación de la interface rueda-riel para disminuir coeficientes de fricción (IWNICKI, 2006, 221).

13.7 PREGUNTAS PARA EL SISTEMA EXPERTO

A continuación se listan las preguntas realizadas a un experto⁸ para obtener el conocimiento necesario para la construcción del sistema experto.

- ¿Qué componentes de la máquina se van a monitorear para el sistema experto?

R// Se monitoreara la interface rueda-riel

- ¿Qué variables se desean controlar para el sistema? (vibraciones, temperatura, etc.)

R// Se desean controlar el ángulo de la pestaña, coeficiente de fricción rueda-riel, fuerzas laterales y verticales.

- ¿Cómo se van a tomar estas mediciones? (sensores, etc.)

R// Por medio de sensores y strain gages.

- ¿Cada cuanto se tomaran estas mediciones?

R// Periodicidad aun no definida.

- ¿Cuál es el coeficiente de fricción entre la rueda y el riel?

R// 0.5 en condición seca, 0.2 húmedo, 0.16 en condición de lubricación⁹.

Valor Metro de Medellín: 0.35.

- ¿Cuáles son los valores de Sh (altura de la pestaña de la rueda)?

⁸ GEMI- Grupo de Estudios en Mantenimiento Industrial. Universidad EAFIT. 2008

⁹ Datos aportados por Peter Klauser, asesor internacional, 2008.

R// Depende de la condición de la máquina. Según la normatividad UK debe estar entre 6.5 mm y 4 mm. El límite europeo 5mm. Metro de Medellín $Sh \geq Sh_{(Teórico)}$

- ¿Cuáles son los valores de Qr (escarpadura de la pestaña de la rueda)?

R// Depende de la condición de la máquina. Según la normatividad europea $Qr > 6.5$ mm. Metro de Medellín $Qr \geq 0.8 Qr_{(Teórico)}$

- ¿Cuáles son los valores de la fuerza lateral Y?

R// Depende de la condición de la máquina.

- ¿Cuáles son los valores de la fuerza vertical Q?

R// Depende de la condición de la máquina. $Q = Q_{est} + Q_{din}$

Con las respuestas a estas preguntas se puede proceder a establecer las reglas necesarias para la construcción del sistema experto en mantenimiento y su aplicación en el índice de seguridad en marcha de vehículos ferroviarios.

Cabe aclarar que existen muchas variables que se podrían controlar en la interface rueda-riel como diámetros, ovalización etc., pero solo se incluyen las variables Sh y Qr de la rueda y el coeficiente de fricción, ya que solo estas son relevantes para evaluar el índice de seguridad en marcha según el criterio de Nadal.

13.8 SISTEMA PARA EVALUAR EL INDICE DE SEGURIDAD EN MARCHA DE VEHICULOS FERROVIARIOS SEGUN EL CRITERIO DE NADAL

13.8.1 Descripción del Sistema. El sistema experto evalúa la condición de la pestaña de la rueda, obteniendo el ángulo de la rueda de datos ingresados por el usuario y diciendo si este se encuentra en un valor admitido que no ponga en riesgo la seguridad del vehículo ferroviario. En caso de que este ángulo no esté en un valor admisible, el sistema da recomendaciones sobre procedimientos a realizar para que la rueda se encuentre en condiciones de operación segura.

El sistema también evalúa el coeficiente de fricción rueda-riel obtenido del usuario y da recomendaciones dependiendo de su estado.

Utilizando el criterio de Nadal, el sistema halla la relación Y/Q teórica con la Ecuación 22 y según su valor, emite juicios acerca de su estado y da recomendaciones sobre como incrementar su valor.

Ecuación 22. Relación Y/Q teórica

$$\frac{Y}{Q}_{teo} = \frac{\tan\delta - \mu}{1 + \mu \tan\delta}$$

La relación Y/Q real se halla con datos de la fuerza lateral y vertical obtenidos del usuario para luego ser comparada con la relación Y/Q teórica y dependiendo de su estado, el sistema emite juicios y da recomendaciones. En caso de que la relación real sea menor que la teórica, el sistema da un porcentaje de seguridad que se tiene frente al riesgo de descarrilamiento. En caso contrario, el sistema emite recomendaciones sobre como incrementar la seguridad en el vehículo.

El sistema también evalúa la seguridad del vehículo según el criterio de Chartet, tomando el valor teórico de la fuerza vertical Q y comparándolo con la fuerza Q experimental, si esta última es menor que el 60% de la teórica, el sistema emitirá una alarma.

En el anexo 5 se encuentran las reglas que utiliza el sistema.

13.8.2 Variables del Sistema.

En la Tabla 7 se muestran las variables utilizadas en el sistema con su tipo, descripción y su forma de ser obtenidas.

Tabla 7. Variables utilizadas en el sistema

Variable	Tipo	Descripción	Se Obtiene
Menu1	Lista Estática	Pregunta al usuario si se desea evaluar el índice de seguridad. Tiene dos respuestas posibles: sí y no.	Introducida por el usuario.
Sh	Numérica	Describe la altura de la pestaña de la rueda.	Introducida por el usuario.
Qr	Numérica	Describe la escarpadura de la pestaña de la rueda.	Introducida por el usuario.

Variable	Tipo	Descripción	Se Obtiene
Ángulo	Numérica	Describe el ángulo de la pestaña de la rueda.	Inferida por el sistema.
Condicion_rueda	Lista Estática	Evalúa la condición de la rueda.	Inferida por el sistema.
Co_fric	Numérica	Describe el coeficiente de fricción rueda-riel.	Introducida por el usuario.
Condicion_friccion	Lista Estática	Evalúa la condición del coeficiente de fricción.	Inferida por el sistema.
Yqteo	Numérica	Describe la relación Y/Q teórica.	Inferida por el sistema.
Condicion_YQteo	Lista Estática	Evalúa la condición de la relación Y/Q teórica.	Inferida por el sistema.
Yreal	Numérica	Describe el valor de la fuerza lateral.	Introducida por el usuario.
Qreal	Numérica	Describe el valor de la fuerza vertical.	Introducida por el usuario.
YQreal	Numérica	Describe la relación Y/Q real.	Inferida por el sistema.
Condicion_YQreal	Lista Estática	Evalúa la condición de la relación Y/Q real.	Inferida por el sistema.
Mg_segur	Numérica	Describe el margen de seguridad de la relación Y/Q real sobre la teórica	Inferida por el sistema.
Recomendación1	Lista Estática	Emite recomendaciones del sistema.	Inferida por el sistema.
Mg_segur2	Numerica	Describe el margen de seguridad entre la Qreal y el criterio de Chartet.	Inferida por el sistema.
Qteo	Numerica	Describe el valor de la fuerza vertical teórica en una rueda	Inferida por el sistema.
Coche	Lista Estática	Pregunta al usuario que tipo de coche es el que se va a evaluar. (A,B o R)	Introducida por el usuario.
Chartet	Numerica	Describe el valor del criterio de Chartet	Inferida por el sistema.
Condicion_Chartet	Lista Estática	Describe la Condicion de la fuerza Q real frente al criterio de Chartet	Inferida por el sistema.

13.8.3 Fuerzas Laterales y Verticales para el Sistema. El sistema debe determinar la relación Y/Q real para inferir si esta se encuentra dentro de los límites permitidos para un riesgo mínimo de descarrilamiento del vehículo ferroviario.

Estas fuerzas deben ser ingresadas por el usuario al sistema. Se recomienda que las fuerzas se tomen con el vehículo sin carga, ya que bajo estas condiciones se obtendrá la relación Y/Q más alta, debido a que las cargas verticales serán más bajas.

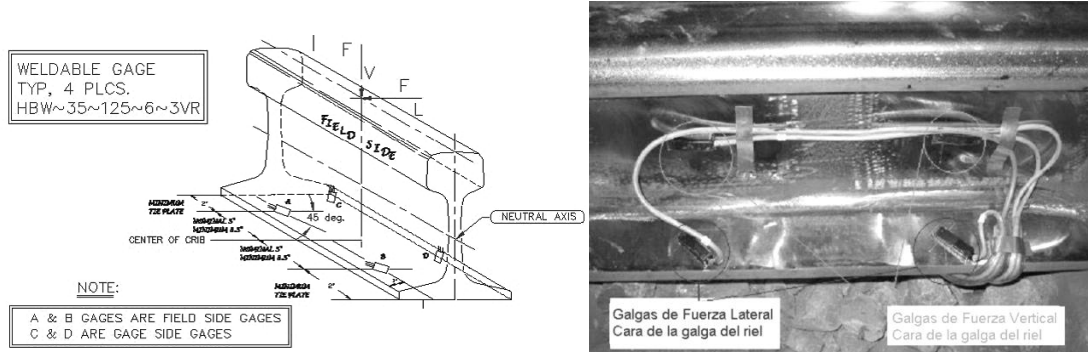
Se realiza el procedimiento para las mediciones de fuerzas en la interface rueda-riel en la vía. El método debe ser desarrollado según el arreglo específico de strain gages montados en el riel (Véase Ilustración 45).

El arreglo de strain gages se compone de ocho galgas por punto de medición, con tres puntos de medición por riel. Cada punto de medición debe estar ubicado en la mitad entre dos durmientes. Las mediciones son tomadas en tres posiciones adyacentes y separadas por la distancia entre ejes del bogie. El sitio de medición se crea con un total de seis puntos de medición, tres por cada riel. La medición vertical se toma utilizando $\frac{1}{4}$ de arreglo en una configuración de puente completa. Las galgas son colocadas sobre la trocha y al lado del riel (field side). La altura de las galgas debe corresponder al eje neutro del riel (neutral axis).

La medición lateral se toma utilizando cuatro strain gages uni-axiales en una configuración de puente completa. Las galgas están en el pie del riel, sobre la trocha y el lado del riel (gauge y field side).

Se han establecido diferentes velocidades de marcha $V=\{20, 40, 60, 80\}$ km/h, el cual cubre el rango de operación del vehículo hasta la velocidad máxima de operación permitida por estándares de seguridad (80km/h). Para cada velocidad V han sido realizadas una serie de pruebas en un tramo de vía curva comercial característico de un radio de curvatura de $R = 445\text{m}$ y longitud $L = 200\text{m}$ con un vehículo sin carga útil.

Ilustración 45. Configuración del montaje para la medición de fuerzas rueda-riel



Grupo de Estudios en Mantenimiento Industrial – GEMI

En el ANEXO 6 – FUERZAS LATERALES Y VERTICALES OBTENIDAS EXPERIMENTALMENTE, se encuentran las fuerzas obtenidas experimentalmente para las 48 ruedas de los 12 ejes del vehículo.

13.8.4 Estructura del sistema. A continuación se muestran los diagramas de la estructura del sistema. Allí se pueden apreciar las entradas y salidas del sistema así como el procesamiento de la información.

Ilustración 46. Entradas y salidas del sistema

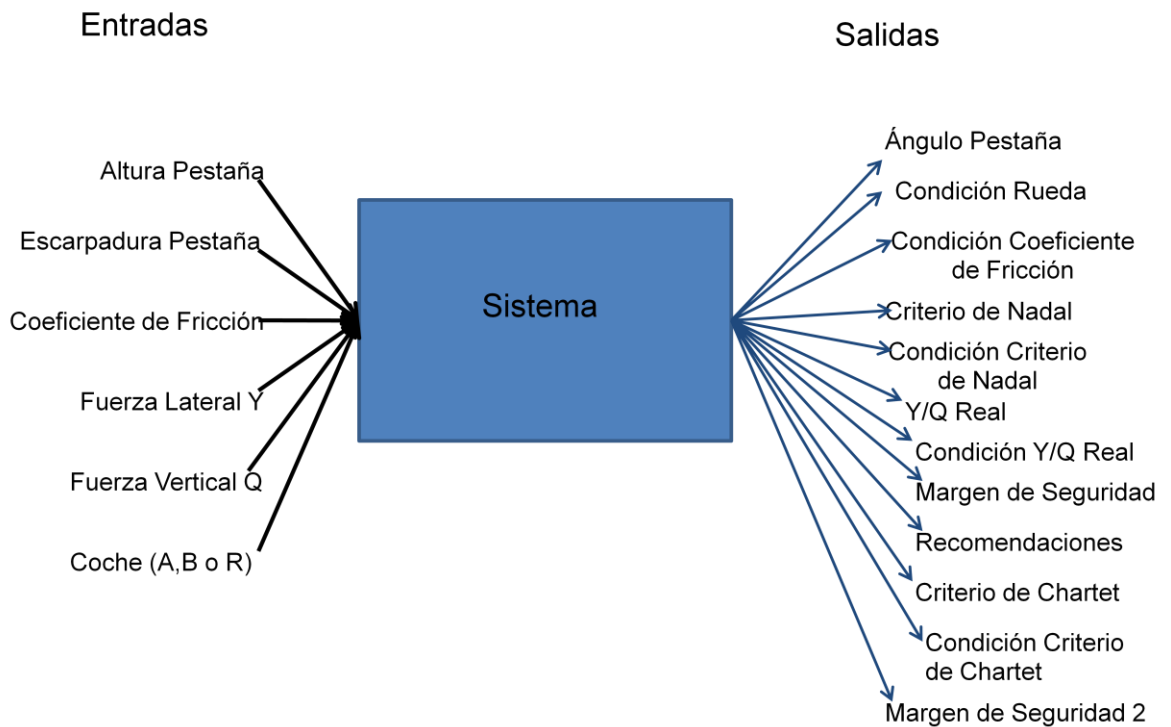
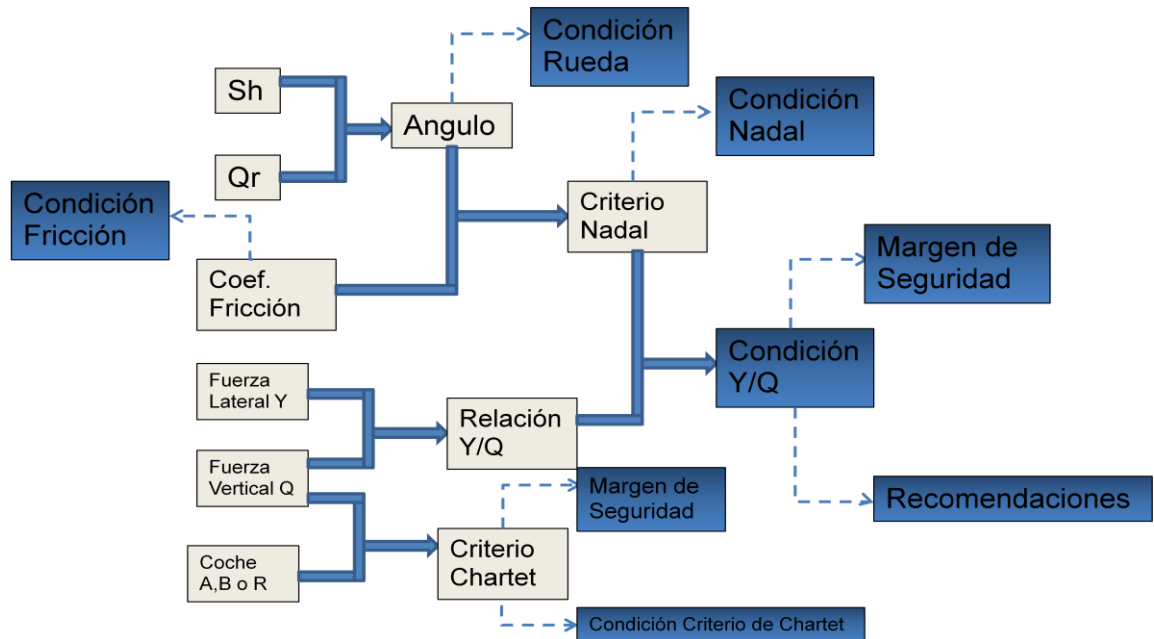


Ilustración 47. Diagrama de flujo de información del sistema



13.8.5 Evaluación del Índice de Seguridad Mediante un Sistema Experto. Se alimenta el sistema experto con los datos de entrada y de esta manera se configura. Se definen los siguientes pasos a seguir para realizar la evaluación del índice de seguridad en el vehículo ferroviario objeto de estudio.

A continuación se describirán los pasos de ejecución del sistema:

Paso 1: Pantalla de presentación del sistema. Pulse ok para continuar (Véase Ilustración 48-a).

Paso 2: Menú del sistema. De click en si y luego en ok para continuar (Véase Ilustración 48-b).

Paso 3: Ingresar la altura de la pestaña de la rueda. Pulse ok para continuar (Véase Ilustración 48-c).

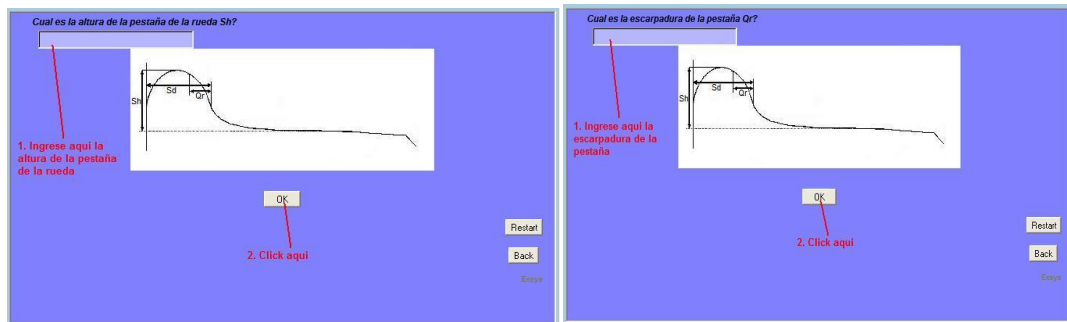
Paso 4: Ingresar la escarpadura de la pestaña de la rueda. Pulse ok para continuar (Véase Ilustración 48-d).

Ilustración 48. Primeros 4 pasos del sistema



a. Pantalla principal del sistema

b. Menú principal del sistema



c. Pantalla 3 del sistema

d. Pantalla 4 del sistema

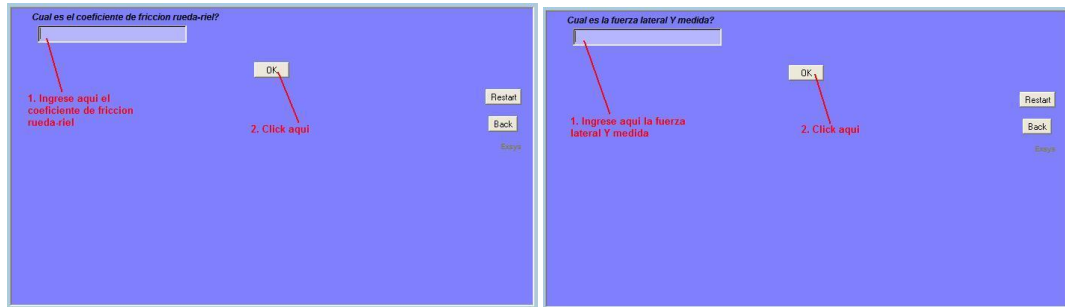
Paso 5: Ingresar el coeficiente de fricción rueda-riel. Pulse **ok** para continuar (Véase Ilustración 49-a).

Paso 6: Ingrese la fuerza lateral Y medida experimentalmente. Pulse **ok** para continuar (Véase Ilustración 49-b).

Paso 7: Ingrese la carga vertical Q medida experimentalmente. Pulse **ok** para continuar (Véase Ilustración 49-c).

Paso 8: Seleccione a que coche pertenece la rueda. Pulse **ok** para continuar (Véase Ilustración 49-d).

Ilustración 49. Segundos 4 pasos del sistema



b. Pantalla 5 del sistema

a. Pantalla 5 del sistema



d. Pantalla 7 del sistema

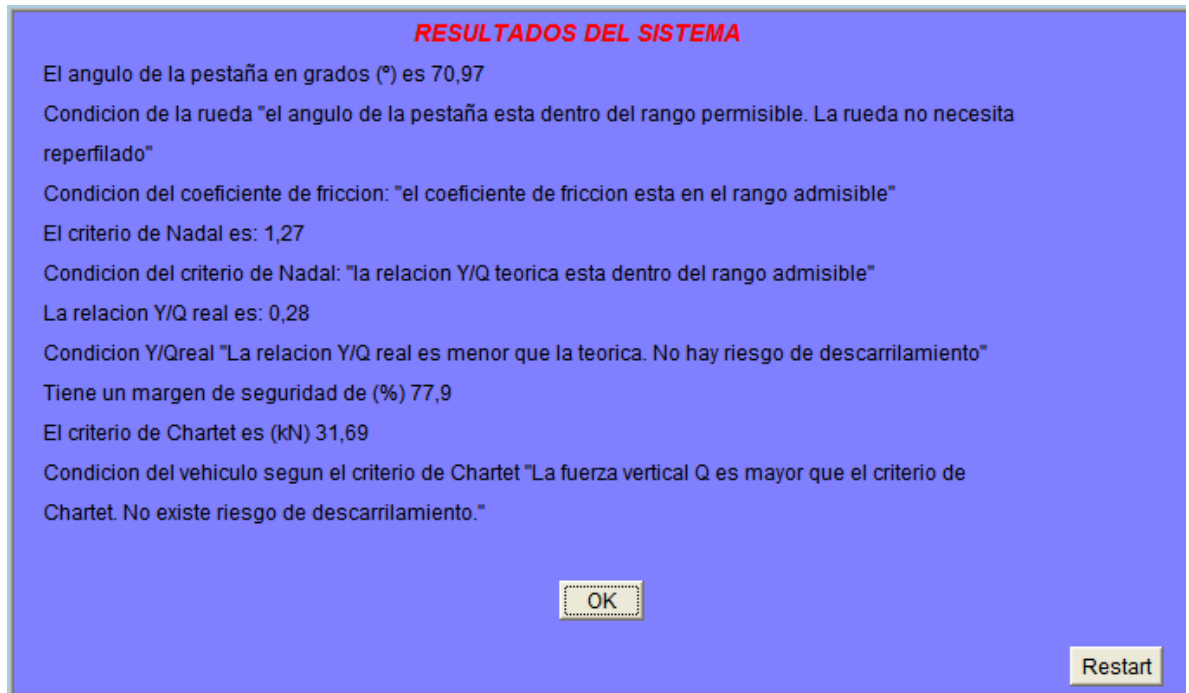
c. Pantalla 8 del sistema

13.8.6 Presentación de Resultados. A continuación se presentaran dos escenarios con el fin de comparar el índice de seguridad bajo dos condiciones: uno con condiciones optimistas y otro con condiciones pesimistas.

13.8.6.1 Resultados Bajo Condiciones Optimistas. El siguiente escenario se realiza con condiciones optimistas y muestra unos resultados en los cuales el vehículo no se encuentra en riesgo de sufrir descarrilamiento (Véase Ilustración 50).

Los parámetros utilizados para ejecutar el sistema bajo este escenario son los siguientes: Sh (Altura de la pestaña): 29 mm; Qr (escarpadura de la pestaña): 10 mm; Coeficiente de fricción μ : 0.35; Fuerza lateral Y medida: 18.39 kN; Carga vertical Q medida: 65.75 kN.

Ilustración 50. Pantalla de resultados bajo condiciones optimistas



Bajo las condiciones mencionadas anteriormente, en la Ilustración 50, se puede observar que el ángulo de la pestaña es de 70.97° , lo cual según los criterios anteriormente mencionados indica que la rueda está en buenas condiciones y no necesita reperfilado. El coeficiente de fricción ingresado de 0.35 está en el rango admisible. El criterio de Nadal según el ángulo de la pestaña obtenido, y el coeficiente de fricción ingresado, da un valor de 1.27, el cual según la teoría esta dentro del rango admisible. La relación Y/Q real obtenida a partir de las fuerzas ingresadas, da un valor de 0.28 la cual es menor en un 77,9% que la teórica el cual es el margen de seguridad que se tiene bajo estas condiciones. El criterio de Chartet da un valor de 31.69 kN, el cual es menor que la carga vertical Q ingresada de 65.75 kN, lo cual indica que no existe riesgo de descarrilamiento según este criterio.

Al evaluar el vehículo bajo estas condiciones según los criterios de Nadal y de Chartet, se concluye que este está en buenas condiciones en cuanto al índice de seguridad en marcha y no existe riesgo de descarrilamiento.

13.8.6.2 Resultados Bajo Condiciones Pesimistas. El siguiente escenario se realiza bajo condiciones pesimistas y muestra unos resultados en los cuales el

vehículo se encuentra en riesgo de sufrir descarrilamiento (Véase Ilustración 51).

Los parámetros utilizados para ejecutar el sistema bajo este escenario son los siguientes: Sh (Altura de la pestaña): 25 mm; Qr (escarpadura de la pestaña): 11 mm; Coeficiente de fricción μ : 0.5; Fuerza lateral Y medida: 30 kN; Carga vertical Q medida: 29 kN.

Ilustración 51. Pantalla de resultados bajo condiciones pesimistas

RESULTADOS DEL SISTEMA

El ángulo de la pestaña en grados (°) es 66,25

Condición de la rueda "el ángulo de la rueda esta fuera del rango permisible. Reperfile la rueda para darle un ángulo a la pestaña de 70°"

Condición del coeficiente de fricción: "el coeficiente de fricción es alto. Si la rueda acaba de ser reperfilada, suavice la superficie hasta obtener un coeficiente de fricción de 0.35"

El criterio de Nadal es: 0,83

Condición del criterio de Nadal: "La relación Y/Q teórica es muy baja. Reperfile la rueda hasta obtener un ángulo de pestaña mayor o igual a 70° o suavice la superficie de la rueda hasta obtener un coeficiente de fricción menor o igual a 0.35"

La relación Y/Q real es: 1,03

Condición Y/Qreal "La relación Y/Q real es mayor que la teórica. Existe riesgo de descarrilamiento"

Recomendaciones: Para incrementar la relación Y/Q teórica debe: Reperfile la rueda hasta obtener un ángulo de pestaña mayor o igual a 70°. Suavizar la superficie de contacto para disminuir el coeficiente de fricción a un valor menor o igual a 0.35. Para disminuir la relación Y/Q real debe: Aumentar la carga vertical o disminuir la carga lateral.

El criterio de Chartet es (kN) 31,69

Condición del vehículo según el criterio de Chartet "La fuerza vertical Q es menor que el criterio de Chartet. Existe alto riesgo de descarrilamiento."

OK

Restart

Back

Exsys

Bajo las condiciones mencionadas anteriormente, en la Ilustración 51, se puede observar que el ángulo de la pestaña es de 66.25°, lo cual según los criterios anteriormente mencionados indica que el ángulo de la rueda se encuentra por fuera del rango admisible y necesita ser reperfilado hasta obtener un ángulo de

70°. El coeficiente de fricción ingresado de 0.5 está muy alto, por lo tanto se debe suavizar la superficie hasta obtener un coeficiente de fricción mínimo de 0.35. El criterio de Nadal según el ángulo de la pestaña obtenido y el coeficiente de fricción ingresado, da un valor de 0.83, el cual según la teoría es muy bajo por lo tanto se debe reperfilear la rueda hasta obtener un ángulo de 70° y suavizar las superficies de esta hasta obtener un coeficiente de fricción de 0.35. La relación Y/Q real obtenida a partir de las fuerzas ingresadas, da un valor de 1.03 la cual es mayor que el criterio de Nadal e indica que el vehículo evaluado se encuentra en riesgo de descarrilamiento, por lo tanto se deben aumentar las cargas verticales Q o disminuir las fuerzas laterales Y. El criterio de Chartet da un valor de 31.69 kN, el cual es mayor que la carga vertical Q ingresada de 29 kN, lo cual indica que el vehículo se encuentra en riesgo de descarrilamiento según este criterio.

Al evaluar el vehículo bajo estas condiciones según los criterios de Nadal y de Chartet, se concluye que este está se encuentra en riesgo de sufrir descarrilamiento.

14 CONCLUSIONES

El área de mantenimiento cada vez involucra un mayor número de técnicas que pueden ser aplicadas para la buena gestión y operación de esta. Actualmente se ha dejado de pensar solo en preventivos, predictivos y correctivos para pasar implementar técnicas que puedan ayudar a maximizar la vida útil en la operación de los equipos y a disminuir costos producto de una mala gestión por falta de herramientas para el diagnóstico técnico.

A menudo, los diagnósticos técnicos en equipos modernos y las intervenciones de máquinas requieren de cierto grado de experticia. En muchos casos por la lejanía del sitio, por la tendencia a automatización de procesos o por falta de especialización de los profesionales en un tema dado, cada vez es menor el número de expertos que pueden estar disponibles a la hora de enfrentar un problema técnico en una instalación. Los sistemas expertos se encargan de llevar los conocimientos de un especialista en alguna materia, a una planta o instalación, que por motivos externos, no puedan tener disponibilidad de este a tiempo completo. El sistema experto se encarga de proveer la experticia y de dar recomendaciones especializadas a operarios o encargados de mantenimiento que no tienen dicho conocimiento, a partir de información básica ingresada por estos.

En este marco los sistemas expertos son de gran utilidad pues ayudan a disminuir costos de mantenimiento debido a que no es necesario tener un experto en algún tema a disposición completa de una organización y no es necesario hacerlo viajar hasta la planta o instalación para resolver el problema lo que genera un gran ahorro al no tener que estar pagando constantes pasajes, viáticos y honorarios exigidos por este.

La interface rueda-riel en un vehículo ferroviario, posee unos parámetros muy importantes de controlar a la hora de evaluar la seguridad en marcha del vehículo. Entre los parámetros más importantes de la rueda están la altura y la escarpadura de la pestaña de donde se deriva el ángulo de la misma, el cual es

un parámetro de mucho peso para establecer el índice de seguridad en marcha del vehículo, y cuyo valor óptimo se encuentra en 70° para el vehículo evaluado. El otro factor que altera la ecuación es el coeficiente de fricción rueda-riel, el cual es importante mantener en un valor cercano a 0.35 (para el vehículo evaluado), ya que su relación es inversamente proporcional al límite Y/Q del vehículo, a medida que aumenta el coeficiente de fricción, el límite Y/Q disminuye, aumentando así la posibilidad de que la relación Y/Q real supere el límite y se produzca un accidente por descarrilamiento.

El sistema experto desarrollado, toma los valores de altura y escarpadura de la pestaña de la rueda así como el coeficiente de fricción rueda-riel y deriva la relación Y/Q teórica para luego tomar la información de fuerzas laterales y verticales y de esta manera emitir conceptos del estado del índice de seguridad en marcha del vehículo y dar recomendaciones de acciones preventivas a tomar de ser estas necesarias. Este sistema constituye una herramienta para el diagnóstico de la interface rueda-riel la cual puede ayudar a llevar a cabo una mejor planeación de los mantenimientos con el fin de optimizar los recursos manteniendo un alto índice de seguridad en marcha del vehículo.

15 RECOMENDACIONES

Los sistemas expertos son una rama que puede evolucionar hasta un nivel muy superior al actual en el cual gran parte de los problemas de toma de decisiones que se generan hoy, puedan ser resueltos con sistemas expertos. La base de conocimientos es la que permite resolver un mayor número de problemas dependiendo de la cantidad y calidad de información que se tenga almacenada allí. Se recomienda actualizar la base de conocimientos a medida que se tenga mayor información y experiencia con la resolución de nuevos problemas para aumentar de esta manera el rango de los problemas que puede resolver el sistema.

Para el desarrollo de un sistema experto más completo, se recomienda que el ingeniero de conocimiento o desarrollador tenga un buen manejo de bases de datos y sus comandos para que de esta manera, no sea necesario que los datos sean ingresados por el usuario, simplemente organizados en una base de datos y que el sistema los pueda leer y emitir conceptos sobre el estado de la máquina y dar las recomendaciones necesarias basadas en el estado de la misma.

La ventaja de realizar el programa basado en bases de datos es que se pueden analizar varias ruedas y varias fuerzas simultáneamente y obtener el estado y las recomendaciones de acciones necesarias, solo para las ruedas que estén por fuera del rango de los criterios de seguridad.

16 NUEVAS LINEAS DE INVESTIGACION

Los sistemas expertos son un área que tiene un gran perfil de expansión ya que estos se pueden utilizar para casi cualquier problema en la toma de decisiones que involucre la experticia humana, facilitando así el proceso de resolución de problemas basado en experiencias pasadas.

Como una nueva línea de investigación se propone el desarrollo de interfaces amigables entre sistemas expertos y sistemas de información de mantenimiento (CMMS). De esta manera un sistema experto al detectar una anomalía en el funcionamiento del sistema, puede dar recomendaciones acerca de esta situación y adicionalmente generar una orden de trabajo para un equipo específico en la cual se describan los procedimientos necesarios así como materiales y mano de obra y de esta manera llevar un control más estricto para la gestión de mantenimiento. Además, las mediciones tomadas pueden ser guardadas en el historial de mantenimiento de cada equipo y componente para referencias futuras.

El monitoreo en línea de equipos es también un área de aplicación muy grande para los sistemas expertos, ya que estos pueden estar monitoreando las variables a controlar del sistema, en tiempo real y en caso de detectar algún funcionamiento anormal, dar las recomendaciones necesarias para corregir este problema.

17 BIBLIOGRAFIA

17.1 CLASICA

ARNAIZ, Aitor y GILABERT, Eduardo. Mantenimiento Ingeniería Industrial y Edificios: Uso de Sistemas Expertos Probabilísticos Para Aplicaciones de Mantenimiento y Diagnostico. España. Nº 187. año 2005 mes 9. p. 39-46.

BELLMAN, R.E. An Introduction To Artificial Intelligence: Can Computers Think?. San Francisco, Estados Unidos: Boyd & Fraser Publishing Company, 1978. p. 29-32.

BERNAL PAREDES, Gabriel Jaime y GUTIERREZ RESTREPO, Juan Camilo. Aplicación De Redes Neuronales En La Programación Y Control De La Producción. Medellin, Colombia, 1999. Trabajo de grado (Ingeniero de Produccion). Universidad EAFIT.

CHARNIAK, E. and MCDERMOTT, D. Introduction To Artificial Intelligence. Massachusetts, Estados Unidos: Addison-Wesley- Reading, 1985.

COX, Earl. The Fuzzy Systems Handbook. Massachusetts, Estados Unidos: A P Professional. 1994.

DEMUTH, Howard and BEALE, Mark. Neural Network Toolbox user's guide. Estados Unidos: The MathWorks, 1996. p. 1-1.

ESVELD, Coenraad. Modern Railway Track. 2 ed. Holanda: MRT- Productions, 2001. p. 57-68.

GUIARRATANO, Joseph y RILEY, Gary. Sistemas Expertos principios y programación. 3 ed. Mexico: International Thompson Editores, 2001.

HAUGELAND, J. Artificial Intelligence: The Very Idea. Massachusetts, Estados Unidos: MIT Press, 1985.

HAYES-ROTH, Frederick, WATERMAN, Donald A and LENAT, Douglas B. Building Expert Systems. Vol 1. Massachusetts, Estados Unidos: Addison-Wesley Publishing Company, 1983.

HAYKIN, Simon. Neural Networks, A Comprehensive Foundation. New York, Estados Unidos: Macmillan College Publishing Company, 1994. p. 12-21.

IWNICKI, Simon. Handbook of Railway Vehicle Dynamics. Londres, Inglaterra: CRC Press, 2006. p. 212-221.

JACKSON, Peter. Introduction to expert systems. 2 ed. International Computer Science Series. Londres, Inglaterra: Addison-Wesley Publishing Company, 1990. p. 3-5.

JARAMILLO MONTOYA, Juan Esteban y VELASQUEZ URIBE, José Vicente. Sistema Experto Para El Diagnostico De Fallas Automotrices. Medellin, Colombia, 1993. Trabajo de grado (Ingeniero de Sistemas). Universidad EAFIT. p. 7-9.

JENSEN, Finn V. Bayesian Networks and Decision Graphs. New York, Estados Unidos: Springer-Verlag, 2001.

KASABOV, Nikola K. Foundations Of Neural Networks, Fuzzy Systems, And Knowledge Engineering. Massachusetts, Estados Unidos: MIT Press, 1996.

KURZWEIL, R. The Age Of Intelligent Machines. Massachusetts, Estados Unidos: MIT Press, 1990.

LONDOÑO LOAIZA, Juan de Dios. Teoría General Sobre La Aplicación De Sistemas Expertos. Medellín, Colombia, 1988. Trabajo de grado (Ingeniero de Sistemas). Universidad EAFIT. p. 1-7.

MARIN SEPULVEDA, Augusto León. Implementación de Criterios de Seguridad y Confort en la Evaluación del Estado Técnico de Vehículos Ferroviarios. Medellín, Colombia, 2006. Tesis de grado (Maestría en Ingeniería Mecánica). Universidad EAFIT. p. 8-21, 120.

NEAPOLITAN, Richard. Learning Bayesian Networks. New Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall, 2004.

NILSSON, N.J. Artificial Intelligence: A New Synthesis. California, Estados Unidos: Morgan Kaufmann, 1998.

OSPINA GAVIRIA, Jorge Armando. Hacia una metodología para desarrollar sistemas expertos. Santa fe de Bogotá: Universidad de Los Andes. Centro de Estudios e Investigaciones de la Facultad de Ingeniería (CIFI); Centro de Documentación de Ingeniería, 1993. 22p.

PALACIO LOPEZ, Mauricio Enrico. Determinación de Componentes Principales de Observación Para Evaluar el Estado Técnico de la Interface Vía-Vehículo. Medellín, Colombia, 2006. Tesis de grado (Maestría en Ingeniería Mecánica). Universidad EAFIT.

PARRA MOLINA, Sandra Ivonne. Redes Neuronales Artificiales: Descripción, Funcionamiento y Aplicaciones. Medellín, Colombia, 1992. Trabajo de grado (Ingeniero de Sistemas). Universidad EAFIT.

POOLE, D., MACKWORTH, A.K. and GOEBEL, R. Computational Intelligence: A Logical Approach. Oxford, Reino Unido: Oxford University Press, 1998.

RESTREPO RIVAS, Luís Guillermo. Curso Básico de Sistemas Expertos. Medellín, Colombia. 1993. p. 12-16, 58-60.

RICH, E. and KNIGHT, K. Artificial Intelligence. 2 ed. New York, Estados Unidos: Mc Graw Hill, 1991.

STUART, J. Russell and NORVIG, Peter. Artificial Intelligence A Modern Approach. 2 ed. New Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall, 2003.

TORO VALLEJO, José Rodrigo. Implementación de Criterios de Seguridad y Confort en la Evaluación del Estado Técnico de la Vía Permanente. Medellín, Colombia, 2006. Tesis de grado (Maestría en Ingeniería Mecánica). Universidad EAFIT.

VON ALTROCK, Constantin. Fuzzy Logic And NeuroFuzzy Applications Explained. New Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall, 1995. p. 3-23.

WANG, Li-Xin. A Course In Fuzzy Systems And Control. New Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall, 1997.

17.2 INTERNET

REDES-NEURONALES@, 2008. Tomado de la página web: <http://www.redes-neuronales.netfirms.com>

WIKI1@, 2008. Tomado de la página web: http://es.wikipedia.org/wiki/Inteligencia_artificial

WIKI2@, 2008. Tomado de la página web: http://es.wikipedia.org/wiki/Lógica_difusa

WIKI3@, 2008. Tomado de la página web: http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_experto

18 ANEXOS

18.1 ANEXO 1- SISTEMA EXPERTO PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE UNA CENTRAL HIDROELECTRICA

SISTEMA EXPERTO PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

Alejandra Benavides

C.A.R.T.I.F. email: aleben@cartif.es

Sergio Saludes*, Luis J. de Miguel**, José R. Perán***

*C.A.R.T.I.F. email: sersal@cartif.es

**Instituto de Tecnologías Avanzadas de la Producción. Universidad de Valladolid.
email: luimig@eis.uva.es

***Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Valladolid. email:
peran@eis.uva.es

Resumen

Este trabajo muestra el empleo de un sistema experto en el mantenimiento predictivo de una central hidroeléctrica. Para ello, se ha elaborado un prototipo del sistema experto total, formado por las unidades funcionales alternador y turbina de la central hidroeléctrica, con la finalidad de estudiar la viabilidad de esta técnica sobre la totalidad de la central. Finalmente, se valida el prototipo con los datos históricos proporcionados por la central hidroeléctrica, obteniendo resultados satisfactorios, mostrando la utilidad de los sistemas expertos en el mantenimiento predictivo de centrales hidroeléctricas.

Palabras Clave: Mantenimiento predictivo, sistema experto, supervisión, central hidroeléctrica.

La tendencia actual en las centrales hidroeléctricas, así como en todo sistema industrial, es la automatización. Esto conlleva una serie de problemas, como pueden ser la disminución de ingenieros expertos en la central capaces de resolver los problemas que se planteen en la misma durante su funcionamiento, y la necesidad de planificar el mantenimiento.

En este trabajo se propone como solución el empleo de un sistema experto para el mantenimiento predictivo de una central hidroeléctrica, capaz de supervisar el sistema para el diagnóstico de fallos e incidentes (realizando las tareas propias de un experto), y analizar las variables del sistema para predecir averías y planificar intervenciones. Para mostrar la validez y la viabilidad de esta técnica en el mantenimiento predictivo de las centrales hidroeléctricas, se desarrolla un

1 INTRODUCCIÓN

prototipo de sistema experto sobre una central hidroeléctrica existente y se realiza la validación del citado prototipo a partir de datos históricos proporcionados por dicha central.

Este trabajo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2, se muestran las características generales de un sistema experto y su utilidad en el mantenimiento; en la sección 3, se describe la central hidroeléctrica sobre la cual se desarrolla el prototipo de sistema experto; en la sección 4, se muestra la

organización del prototipo; en la sección 5, se indica el funcionamiento del mismo; en la sección 6, se realiza la validación del prototipo; finalmente, en la sección 7 se indican las conclusiones obtenidas del empleo de sistemas expertos en el mantenimiento predictivo de centrales hidroeléctricas.

2 SISTEMAS EXPERTOS EN MANTENIMIENTO

Un sistema experto se define como un programa o algoritmo capaz de resolver problemas complejos sobre un dominio específico (en este caso, una central hidroeléctrica), a un nivel comparable al de un experto humano en el citado dominio.

Dado que el mantenimiento predictivo se caracteriza por la detección de fallos antes de que estos sean críticos sin alterar el funcionamiento normal de la planta, los sistemas expertos en este tipo de mantenimiento se emplean como herramientas de diagnóstico, de modo que vigilen los valores de variables y parámetros para indicar la existencia de fallos antes de que sean críticos.

La arquitectura básica de un sistema experto, como puede verse en la figura 1, está constituida por los siguientes elementos:

- Base de conocimientos: lugar donde se almacena el conocimiento que se extrae

de un experto (en este caso, en forma de reglas de producción con formato IF (variable=umbral) THEN incidente).

- Motor de inferencias: encargado de desencadenar el proceso de razonamiento, recorriendo la base de conocimientos a partir de los datos almacenados en la base de hechos, en función del mecanismo de inferencia almacenado (en este caso, encadenamiento hacia delante).

- Base de hechos: memoria de trabajo de la aplicación, en la que se almacenan los hechos iniciales, inferidos, y los proporcionados por algún tipo de sistema de adquisición.

- Interface: mecanismo de comunicación entre el software que implementa el sistema experto y el usuario final, con el objetivo de permitir la comunicación bidireccional entre ambos.



Figura 1: Arquitectura de un sistema experto

Los módulos de explicación y de adquisición del conocimiento (encargados de explicar las decisiones proporcionadas por el sistema experto, y de adquirir la información proporcionada por un experto, respectivamente), son elementos accesorios. Por otra parte, el experto y el usuario final son los elementos fundamentales del mismo, puesto que el primero proporciona su sabiduría y experiencia al sistema experto, para que el segundo pueda interpretarlo a través de un interface gráfico.

A continuación, se indica el ciclo de vida de un sistema experto. Como puede verse en el diagrama de flujo de la figura 2, aparecen señaladas las cinco primeras etapas del mismo; esto es debido a que es la parte que se va a tratar, puesto que el objetivo de este artículo es mostrar el prototipo de sistema experto de la central hidroeléctrica.

Las distintas etapas hasta la construcción del prototipo constituyen el análisis del problema a tratar, la elección de la herramienta de desarrollo en función

de los requerimientos del sistema, la aplicación de la ingeniería de conocimiento (extracción del conocimiento de todas las fuentes posibles), el desarrollo de la base de conocimientos (traducir el conocimiento adquirido a formato de reglas de producción) y construcción del prototipo.

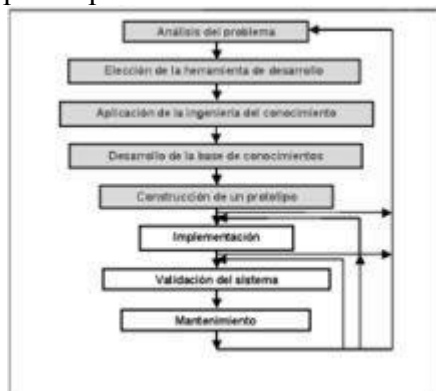


Figura 2: Ciclo de vida de un sistema experto

El prototipo de un sistema experto es un programa que contiene una parte proporcional de la base de conocimientos global. Durante su creación, se toman las decisiones de diseño (selección del paradigma de inferencia, selección de la representación del conocimiento, ...), se implementa el prototipo, se prueba, mostrando el funcionamiento del mismo con el objetivo de validarlo y, en función de los resultados obtenidos en la

validación, se revisa el proyecto para realizar las modificaciones oportunas.

Una vez implementado y validado el prototipo, si su funcionamiento es el deseado, el diagrama de flujo continúa en la etapa de implementación (desarrollo del sistema experto en su totalidad e implantación en el sistema físico a controlar o diagnosticar); posteriormente, se valida el sistema con los datos extraídos en tiempo real, considerando las soluciones aportadas por los expertos. Finalmente, aparece una etapa de mantenimiento, en la cual se amplía el

contenido de la base de conocimientos a medida que aparecen nuevos incidentes.

3 DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

La central hidroeléctrica sobre la cual se desarrolla el prototipo de sistema experto es la central Villalcampo I, ubicada en la provincia de Zamora. Dicha central está caracterizada por poseer tres grupos alternador-turbina, junto con un sistema de servicios generales común a los tres grupos. Cada grupo, puede dividirse en las siguientes unidades funcionales, las cuales se tratarán por separado en la realización del sistema experto:

- Toma de aguas.
- Turbina.
- Alternador.
- Sistema de excitación.
- Transformador.
- Sistema de agotamiento.

Dicha central está caracterizada por tener una potencia nominal de 44750 CV, una velocidad de giro de 125 r.p.m. y un salto bruto de 37m.

Dado que un prototipo recoge la base de conocimientos asociada una parte de la central, las unidades funcionales que se han escogido para este fin, son el alternador y la turbina, que suponen un

40% (200 reglas de producción) de la totalidad de la base de conocimientos (formada por 500 reglas, aproximadamente). En el prototipo, se han insertado los tres grupos que la central hidroeléctrica posee, para proporcionar una mayor generalidad al estudio (reglas de producción comunes a los tres grupos).

4 DESARROLLO DEL PROTOTIPO

Para ver cómo se ha constituido el prototipo, se divide este apartado en las siguientes partes:

4.1 ESQUEMA DEL PROTOTIPO DE SISTEMA EXPERTO

El esquema genérico de un sistema experto puede observarse en la figura 3.

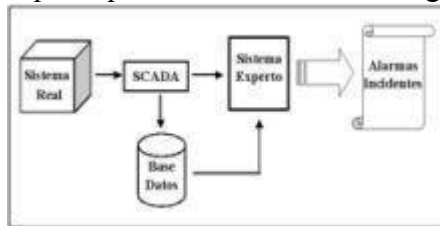


Figura 3: Esquema de un sistema experto

En él, pueden verse distintas cajas: el sistema real representa, en este caso, la central hidroeléctrica sobre la cual se desarrollará el prototipo de sistema experto; un sistema de adquisición de datos, que permitirá obtener los valores de variables necesarias para el funcionamiento del sistema experto; una base de datos, que permitirá la creación de históricos a partir de los valores de las variables proporcionados por el sistema de adquisición, y alimentará a su vez al sistema experto; el sistema experto se encarga del diagnóstico del sistema; finalmente, aparece el interface de usuario, que indica las alarmas e incidentes resultantes de la gestión del sistema experto.

El esquema del prototipo del sistema experto presenta algunas variaciones respecto al anterior, como puede observarse en la figura 4. En él se observa la ausencia de un sistema real, sustituyendo éste por un conjunto de datos históricos almacenados en algún tipo de soporte informático a partir del cual se genera una base de datos análoga a la disponible en el sistema real.

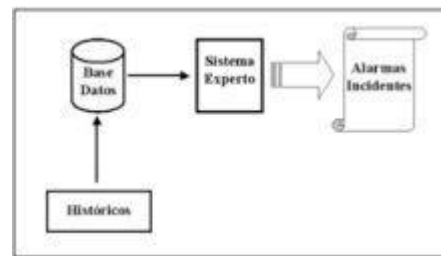


Figura 4: Esquema del prototipo de sistema experto

4.2 HERRAMIENTA DE PROGRAMACIÓN

Para el desarrollo del prototipo del sistema experto, se ha empleado la herramienta G2, caracterizada por permitir programación modular (lo cual facilita el diagnóstico independiente de cada una de las unidades funcionales), comunicación con otro tipo de aplicaciones (posibilitando la comunicación con la base de datos de la que se extraerá la información), soporte en distintas plataformas (en este caso, en

estación SUN), trabajo en tiempo real, tratamiento de la incertidumbre con lógica difusa y programación en lenguaje natural, además de ser una programación orientada a objetos.

La base de datos con la que el sistema experto se comunica, esta creada en Sybase, para lo cual se ha creado un puente de comunicación que permita al prototipo extraer los valores de las variables requeridas.

4.3 ESTRUCTURA DE LA APLICACIÓN

La estructura bajo la cual se ha desarrollado el prototipo del sistema experto, puede observarse en la figura 5. En ella se observa que la aplicación presenta una estructura jerárquica modular.

La estructuración modular se realiza para insertar la base de conocimiento asociada a cada una de las unidades funcionales de forma independiente, de modo que permita el diagnóstico individualizado de

cada una de ellas (en el esquema, aparece un módulo general, denominado *iberdrola*, del que cuelgan dos módulos hijo, denominados *alternador* y *turbina*, que son hermanos entre sí; en el sistema experto final, aparecerían módulos hermanos de los anteriores, denominados sistema de agotamiento, toma, sistema de excitación, transformador y servicios generales).

La estructuración jerárquica viene justificada desde el punto de vista del desarrollador, puesto que permite trabajar en distintos módulos a varios programadores en paralelo, sin más que cargar un módulo jerárquicamente superior. Esto agiliza el desarrollo del sistema experto global, posibilitando el desarrollo simultáneo de todas las unidades funcionales, sin que las modificaciones de una de ellas afecten al resto de la aplicación.

Debido a la citada estructuración, los módulos que contienen las bases de conocimientos, interface de usuario y base de hechos son los módulos de una jerarquía inferior al módulo raíz, esto es, aquellos que están asociados a unidades funcionales; hay que indicar que dichos módulos emplean un módulo comodín denominado *auxiliar*, en el cual se ubican las definiciones globales

que afectan a las interrelaciones entre módulos.

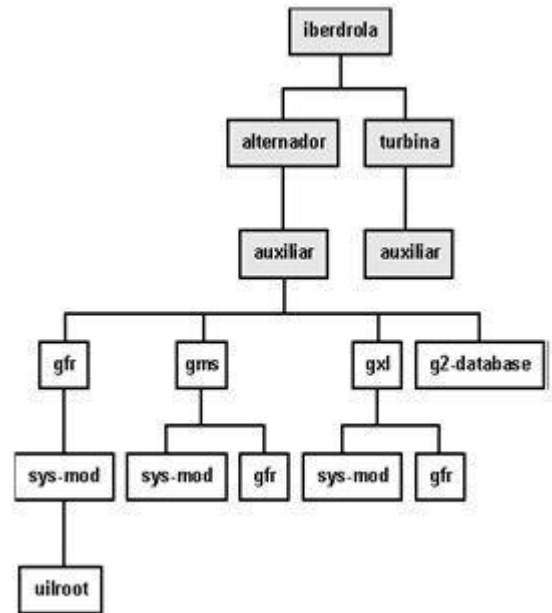


Figura 5: Estructura del prototipo

4.4 BASE DE CONOCIMIENTOS

El contenido de la base de conocimientos puede dividirse en conocimiento declarativo y conocimiento procedimental. El conocimiento declarativo es aquel que está constituido por las definiciones y objetos que constituyen el sistema sobre el cual se va a desarrollar el sistema experto; por otra parte, el conocimiento procedimental está formado por las reglas de producción que asocian los atributos de dichos objetos con los incidentes que se pretenden diagnosticar.

4.4.1 Conocimiento declarativo

El conocimiento declarativo está formado por las definiciones generales, las definiciones específicas y los objetos.

Las definiciones generales se representan mediante clases. Todas las clases que constituyen el prototipo pueden observarse en la figura 5.

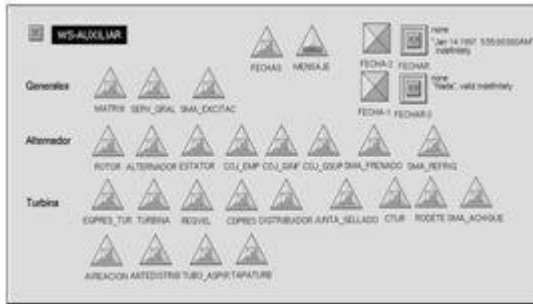


Figura 6: Definiciones de clases del prototipo

Hay que indicar que, en este caso, para los módulos alternador y turbina, se han creado tantas clases como elementos tienen asociados incidentes, según la base de conocimientos.

Por otra parte, existen las definiciones específicas asociadas a las unidades funcionales. En la figura 6 pueden verse este tipo de elementos asociados a la turbina.



Figura 7: Definiciones específicas de la turbina

Cada una de las unidades funcionales tiene asociadas unas variables llave de procedimientos (que impiden el desencadenamiento simultáneo del mismo incidente), unas relaciones, que permiten particularizar las reglas de producción generales, y las tablas de umbrales, que permiten introducir los valores que adoptarán las variables asociadas a los objetos que constituyen la central hidroeléctrica.

Seguidamente, se muestran los objetos empleados en el sistema experto, esto es, las instancias asociadas a las definiciones generales (particularización de las clases para cada una de las unidades funcionales

que constituyen la central): para ello, veamos el caso de los objetos que constituyen la unidad funcional turbina del grupo 2, presentes en la figura 8, y las

interrelaciones que se establecen entre estos elementos:

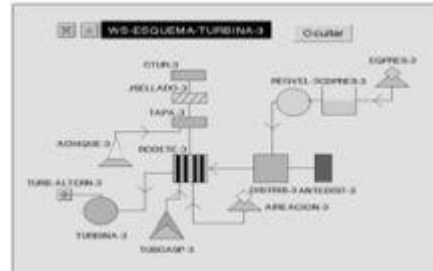


Figura 8: Objetos específicos de la turbina

Para completar el apartado de definiciones, hay que hacer referencia a los elementos empleados en el tratamiento de la incertidumbre (esto es debido a que el sistema experto, al igual que un experto humano, proporciona resultados sobre la aparición de incidentes con un cierto grado de incertidumbre).

Para el tratamiento de la incertidumbre, se emplean matrices de chequeo asociadas a cada uno de los incidentes de cada uno de los elementos susceptibles de fallo. Como ejemplo, en la figura 9 pueden visualizarse las matrices de chequeo asociadas al rotor del grupo 1:



Figura 9: Matrices de chequeo

Cada matriz de chequeo está asociada a un incidente, y está formada por cinco filas y tantas columnas como reglas tenga asociadas cada incidente. El significado de cada uno de los cinco arrays que la constituyen, es el siguiente: el primer array indica si la regla asociada a su posición ha sido

desencadenada o no (si esta se ha desencadenado anteriormente para el mismo elemento, esta se deshabilita hasta que el usuario final considere corregido el incidente; si esto no se realizara así, el usuario recibiría información redundante que le impediría ver con claridad los fallos que se producen); el segundo array almacena la probabilidad asignada a cada una de las reglas; el tercer array, almacena la fiabilidad; el cuarto array contienen el número de regla que se trata; finalmente, el quinto array contiene la probabilidad y la fiabilidad total asociada al incidente.

El paradigma de cálculo de probabilidad implementado corresponde al método de factores de certidumbre; dicho paradigma puede modificarse en función del tipo de tratamiento de incertidumbre que se desee aplicar.

4.4.2 Conocimiento procedimental

El conocimiento procedimental está constituido por las reglas de producción y los procedimientos asociadas a las citadas reglas. Para ver el formato que presentan las reglas de producción, en la figura 10 pueden observarse algunas de las reglas asociadas al estator.



Figura 10: Reglas de producción

Como puede verse, la generalidad de las reglas permite emplear una sola regla para todos los elementos estator existentes en el sistema experto.

Como puede observarse en las reglas, se realizan llamadas a procedimientos, que serán los encargados de informar al

usuario final de la existencia de incidentes a través del interface de usuario, como se verá posteriormente, las definiciones específicas y los objetos.

4.5 MOTOR DE INFERENCIA

El algoritmo que emplea el motor de inferencia para recorrer la base de conocimientos, es el denominado encadenamiento hacia delante o forward chaining. En él, se recorre la base de conocimientos considerando los hechos ciertos de la base de hechos, y se infiere nuevo conocimiento. Esto puede observarse en las reglas de producción presentes en el apartado anterior, en las que se recorre la base de conocimientos comparando los valores de las variables con un umbral; si estas variables satisfacen el antecedente de la regla, entonces la desencadenan, infiriendo la existencia de incidentes.

4.6 BASE DE HECHOS

Como se mencionó anteriormente, la base de hechos está constituida por los datos o valores iniciales, los inferidos y aquellos que se adquieren a partir de algún tipo de sistema de adquisición.

Dado que los

valores iniciales vienen condicionados por las condiciones iniciales del sistema, y los datos inferidos se

obtienen como resultado de la evaluación de reglas, a continuación se indica el modo de obtención de los valores de las variables en cualquier instante de tiempo.

La adquisición de valores de variables se realiza a través de un puente de comunicación entre la aplicación desarrollada con la herramienta de programación G2, y la base de datos SYBASE en la cual se almacenan los datos históricos extraídos de la central (formato que tendrá en el sistema real).

A

continuación, se muestra la etapa de conexión desde el punto de vista de la

aplicación (no considerando los pasos intermedios a realizar antes de establecer la comunicación – variables de entorno en UNIX, etc.-).

La comunicación se realiza a través de elementos de conexión, que en función de los códigos de colores que presenten indican si la comunicación es exitosa y, en caso de no serlo, los motivos por los cuales falla.

Por otra parte, las consultas a la base de datos se realizan a través de procedimientos programados en el lenguaje propio de SYBASE y en el característico de G2, para que sea comprendido por ambos.

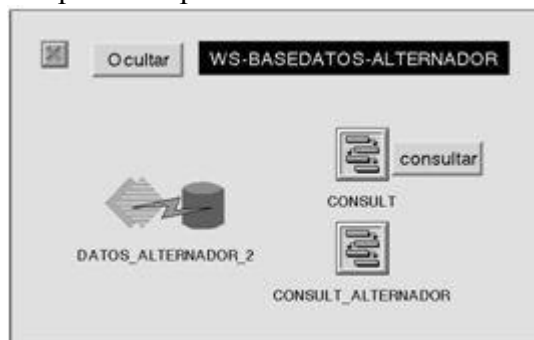


Figura 11: Conexión prototipo - base de datos

El elemento de conexión (con codificación de color en verde, indicativa de comunicación exitosa), y los iconos asociados a los procedimientos que permiten iniciar las consultas, pueden verse en la figura 11. Hay que indicar que la base de datos SYBASE reconstruida a partir de históricos tiene un período de reconstrucción de un minuto, con la finalidad de no almacenar gran imprecisión en los resultados.

4.7 INTERFACE DE USUARIO

Puesto que un sistema experto es una aplicación que ha de estar sujeta a cambios y modificaciones (inserción de nuevo conocimiento), hay que considerar la existencia de distintos niveles de usuario; con esto, aparecen los usuarios

administradores de la aplicación, capaces de realizar todas las modificaciones posibles sobre la misma (desarrollarla, estructurarla y mantenerla); otro tipo de usuarios son los desarrolladores, los cuales disponen privilegios para realizar ciertas modificaciones (modificaciones en la comunicación con la base de datos,...); finalmente, es usuario al que está destinado la aplicación es el usuario final, cuya misión será la supervisión del funcionamiento del sistema experto (para recibir recomendaciones,...), y la introducción de variables manuales.

Para acceder a los distintos paneles del interface de usuario, se dispone de una aplicación tipo Windows, configurable por el administrador, cuyo formato puede visualizarse en la figura 12:

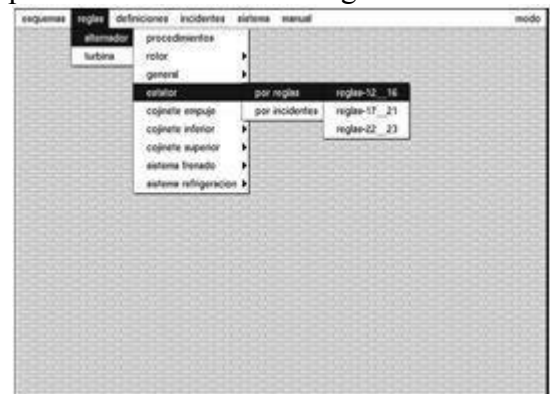


Figura 12: Interface de usuario

A continuación se indica el significado de cada una de las entradas y los paneles a lo que se puede acceder a través de ellas: la entrada esquemas permite el acceso a los esquemas de las unidades funcionales alternador y turbina de cada uno de los grupos; la entrada reglas permite el acceso a todas las reglas de producción y a los procedimientos asociados a las mismas; la entrada definiciones facilita el acceso a las definiciones del sistema experto, tanto generales como específicas, así como a las matrices de incidentes; la entrada incidentes permite el acceso a los paneles de incidentes que reflejan si

el estado de los elementos que componen la central es satisfactorio; la entrada sistema proporciona el acceso a la configuración de la barra de menú, a la comunicación con las bases de datos y a las paletas de los desarrolladores (sólo accesibles en modo administrador); la entrada manual permite el acceso a los paneles de variables manuales, esto es, aquellas que no están sensorizadas ni automatizadas, sino que responden a chequeos periódicos; finalmente, la entrada modo, permite el cambio de modo de trabajo, donde el acceso a modos con privilegios está limitado por contraseña.

5 FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN

Para ver el funcionamiento del prototipo del sistema experto, se muestra un esquema en la figura 13. En él, el funcionamiento se ha dividido en seis etapas:



Figura 13: Funcionamiento de la aplicación

5.1

ETAPA 1: OBSERVACIÓN

Esta etapa representa el estado normal del sistema de diagnóstico; en ella, se realiza un chequeo continuo de todas las reglas para comprobar si se producen condiciones de fallo o no. El sistema experto permanece en esta etapa hasta que se desencadena una regla como consecuencia de la producción de un fallo.

5.2

ETAPA 2: PRODUCCIÓN DE FALLOS

En esta etapa, se produce un fallo, bien por el desencadenamiento de variables automatizadas que han llegado a su umbral de funcionamiento, bien por variables manuales que son desencadenadas como consecuencia del chequeo periódico.

En la figura 14, puede verse el desencadenamiento de dos reglas (r12 y r17) como consecuencia de la activación de la variable descargas parciales en el estator del alternador del grupo 1:



Figura 14: Desencadenamiento de reglas

Como puede verse, aparece un mensaje emergente, indicando la regla desencadenada, el elemento que la ha desencadenado, la unidad funcional a la que pertenece dicho elemento y el grupo, además de indicar la probabilidad y la fiabilidad de dicho incidente. Para documentar el fallo y poder solventarlo, hay que dirigirse a la siguiente etapa.

5.3

ETAPA 3: VISUALIZACIÓN DEL FALLO EN EL ESQUEMA

Para visualizar el fallo en el, hay que dirigirse a la unidad funcional indicada en el mensaje de fallo; en este caso, el alternador del grupo 1. Este panel se presenta en la figura 15.

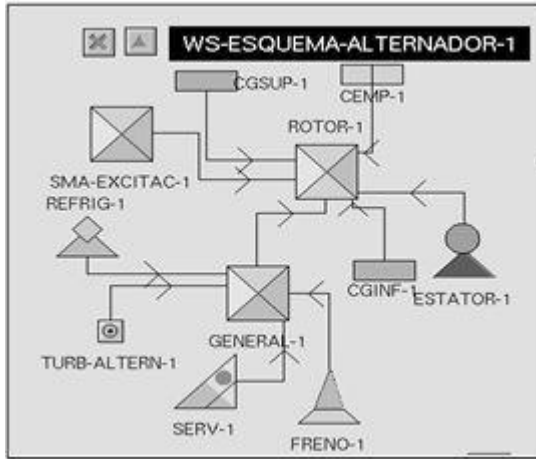


Figura 15: Esquema en presencia de fallo

La aparición de un incidente en un elemento, se refleja a través del cambio de tonalidad del mismo hacia color rojo; esto color se mantendrá hasta que se indique la eliminación del incidente, momento en el cual el citado elemento vuelve a su color original.

En este caso, puede verse que el estator del alternador del grupo 1 tiene como color el rojo, lo cual indica que se ha producido algún tipo de incidente sobre él. Para detallar dicho incidente, hay que pasar a la siguiente etapa.

5.4 ETAPA 4: VISUALIZACIÓN DE LOS INCIDENTES

En esta etapa, se visualiza la probabilidad y la fiabilidad del fallo y el incidente en concreto que se ha producido. Para ello, hay que acceder al panel de incidentes asociado, en este caso el del alternador del grupo 1, presente en la figura 16.



Figura 16: Visualización del incidente

Como puede verse, aparecen dos cambios de tonalidad en los mensajes del estator, los cuales indican la presencia de dos incidentes (aislamiento bajo y perforación en el aislamiento). El cambio de color está asociado a la probabilidad de aparición del incidente (amarillo: inferior al 0.5, rojo: entre 0.5 y 0.7, azul: igual o superior al 0.7). En este caso, la probabilidad es del 0.7, lo cual se corresponde con el color asignado.

Para corregir los incidentes, hay que conocer qué variables lo han desencadenado, para poder actuar en consecuencia; para ello, se visualizan la reglas.

5.5 ETAPA 5: VISUALIZACIÓN DE LAS REGLAS

En esta etapa, se observan las reglas indicadas en el mensaje de fallo, para obtener qué variables han desencadenado incidentes y poder actuar en consecuencia. En este caso, las reglas que

desencadenaron el incidente fueron las reglas r12 y la r17; dado que la variable es la misma, veamos la regla r12, contenida en la figura 16.

En ella, se observa que la variable que origina el incidente es la variable descargas parciales en el estator, por lo que, conociendo esto, ya se podría actuar en consecuencia, con la finalidad de solventar la incidencia.

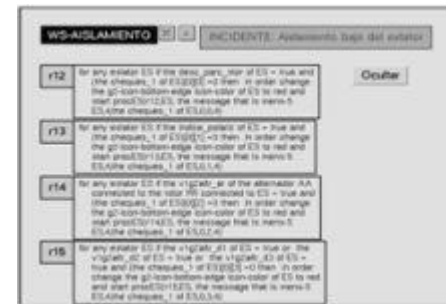


Figura 17: Reglas r12 a r15

5.6 ETAPA 6: CORRECCIÓN DEL

INCIDENTE

En esta etapa ya son conocidas las variables que han desencadenado el incidente. Una vez hecho esto, habría que solucionar el citado incidente (puesto que la causa ya es conocida).

Al producirse un incidente, como hemos visto anteriormente, se deshabilita la regla desencadenada para el elemento en concreto y se cambian de color los iconos asociados al elemento y a sus mensajes de incidentes. Una vez corregida la falta o incidente, hay que indicárselo al sistema experto, para lo cual el operario chequea las casillas asociadas a los mensajes de incidentes, para habilitar de nuevo las reglas y devolver los colores iniciales a los iconos. Si el fallo no se ha solventado, al habilitar de nuevo la regla, esta se desencadena, volviendo al estado de fallo. Si la corrección ha sido satisfactoria, se vuelve al estado de observación.

6 VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO

Para evaluar el funcionamiento del prototipo del sistema experto, se ha creado una base de datos con Sybase, reconstruida a partir de los históricos del año 1997 de la central hidroeléctrica, con período de muestreo de un minuto.

Para realizar la validación del prototipo, se ha lanzado el bridge de comunicación de G2 con Sybase y se ha arrancado la aplicación y las consultas, manteniéndola en funcionamiento durante ocho horas, con el fin de simular el funcionamiento del mismo durante, aproximadamente, los dos primeros meses del año 1997. El resultado de la simulación es un fichero de resultados del cual se puede extraer lo siguiente:

- Desencadenamiento de las reglas: el sistema experto, al tomar los valores de las variables de la base de datos, si estos verifican el antecedente de sus reglas, desencadena incidentes. Esto puede verse en todos los mensajes apareados en el fichero tratado, además de poder visualizarse en la aplicación, mediante los cambios de color y de texto, en mensajes e iconos.
- Efecto memoria: el desencadenamiento de varias reglas asociadas a un incidente, aumenta la probabilidad de que éste suceda, por lo que, la parte asociada a la incertidumbre, también funciona correctamente.
- Chequeo de incidentes: el chequeo de incidentes, origina la reactivación de las reglas que habían sido desencadenadas. Esto ha podido verse durante la ejecución del programa, puesto que una regla ha saltado dos veces, la segunda de ellas, como consecuencia del chequeo del incidente asociado.

Con todo esto puede concluirse que la validación del prototipo es exitosa, lo cual permite el desarrollo del sistema experto para la totalidad de la central hidroeléctrica, puesto que las hipótesis de diseño son correctas y su funcionamiento es el esperado.

7 CONCLUSIONES

En este trabajo, primeramente se ha recopilado la información existente acerca de la central hidroeléctrica, en formato de fichas de incidentes elaboradas por los expertos de la central.

Se ha representado el conocimiento extraído en formato de reglas de producción, las cuales desencadenan incidentes. Dado que estas reglas tienen asociadas probabilidades cualitativas (alta, baja, media), se les ha asignado una codificación cuantitativa para facilitar el tratamiento de la incertidumbre a través de factores de certeza.

Se ha realizado la estructuración del sistema experto, en configuración jerárquica modular.

En el prototipo, se ha insertado el conocimiento asociado a las unidades funcionales alternador y turbina.

La validación parcial realizada es exitosa, puesto que, como pudo comprobarse en el apartado anterior, el prototipo realiza todas las funciones de diagnóstico según se había planificado.

Con todo esto, se puede concluir la viabilidad y utilidad de los sistemas expertos en el mantenimiento predictivo de centrales hidroeléctricas.

Agradecimientos

Este trabajo está recibiendo financiación por el proyecto FEDER 1FD97-0433, cuyo investigador principal es José Ramón Perán González.

Referencias

- [1] González, J. L.; Reco, B., (1996). "Aplicaciones de los Sistemas Expertos en Agricultura", M. P.
- [2] Jackson, P., (1999) "Introduction to Expert Systems", Addison-Wesley Longman Limited, third edition.
- [3] Kandel, A., (1991) "Fuzzy Expert Systems", CRC Press
- [4] McDonald, J. R.; Burt, G. M.; Zielinski, J. S.; McArthur S. D. J., (1997) "Intelligent Knowledge Based Systems in Electrical Power Engineering". Chapman & Hall, first edition.
- [5] Rolston, D. W., (1990) "Principios de Inteligencia Artificial y Sistemas Expertos" MacGraw-Hill. Latino América, S. A.

18.2 ANEXO 2 - SISTEMA EXPERTO DE AYUDA AL MANTENIMIENTO DE OSCILOSCOPIOS ANALÓGICOS

SEMIM. UN SISTEMA EXPERTO DE AYUDA AL MANTENIMIENTO DE OSCILOSCOPIOS ANALÓGICOS

Autores:

Msc. Raúl Carballea Hernández

Dr. Emilio F. González Rodríguez

Dr. Mateo. Lezcano Pérez

Universidad Central de las Villas

Institución: Centro de Desarrollo Electrónico, UCLV, Cuba.

Email: eglez@ceeti.edu.cu

Fax: 53-422-81608, 53-422-22113, Teléfono: 53-422-81351.

RESUMEN

El entrenamiento de personal especializado en los mantenimientos preventivo y correctivo a equipos electrónicos complejos es una tarea de gran importancia para las Instituciones que se dedican a la enseñanza de la Electrónica y además cuentan con Centros dedicados a estos fines. En el presente trabajo se describen las experiencias obtenidas en la asistencia técnica a osciloscopios y su aplicación a un sistema experto para la búsqueda de fallas, como una herramienta adicional para el adiestramiento a profesionales y estudiantes. Se parte de la labor científico-organizativa vinculada a reglas, normativas y la experiencia obtenida durante años por un personal calificado, que ha participado en la enseñanza y ha dado solución a numerosos problemas de este

tipo de equipamiento.

Se expone brevemente como el experto humano aborda un problema para encontrar la solución a una falla. Se describe también la concepción del sistema y las características del programa para la concha Wucshell, que se utiliza como portador y que corre en una microcomputadora Pentium o superior. Se muestra además un ejemplo de la base de conocimientos realizada con este programa.

La concha, el programa y la base de conocimientos son originales. Han sido desarrolladas por los autores que continúan trabajando en esa línea para perfeccionar el trabajo y para elaborar otros programas para Generadores de Funciones y Multímetros Digitales.

Introducción

Los instrumentos electrónicos de medición constituyen una de las herramientas fundamentales para el personal de mantenimiento que trabaja en los sectores industrial y educacional de la sociedad. El adiestramiento de estos especialistas adquiere relevancia, porque asegura el personal capacitado que conservará la disponibilidad técnica y la competitividad de las instituciones y empresas. En los planes de estudio de ingeniería electrónica y otras especialidades afines, se encuentran asignaturas básicas para enseñar electrónica analógica, digital e instrumentación a los educandos.

SEMIM es un sistema experto desarrollado para la búsqueda metódica de fallas en algunos modelos de osciloscopios analógicos muy concretos. Este sistema permite que personas con conocimientos básicos pero inexpertas en la práctica del mantenimiento correctivo, puedan consultar un programa sencillo, didáctico y con interfase amistosa que hace accesible el criterio experto de varios especialistas, para agilizar la solución de las fallas y reincorporar de nuevo al instrumento en servicio.

Mantenimiento correctivo.

La asistencia técnica a osciloscopios analógicos es un buen punto de partida para desarrollar habilidades de las personas que, como parte de su formación, se entrenan en instrumentación electrónica. Los circuitos que lo integran son la aplicación práctica de varias de las materias esenciales estudiadas en ingeniería.

En el trabajo de reparación al experto se le pueden presentar dos variantes, en las cuales el conocimiento heurístico o basado en la experiencia es fundamental:

1. La falla es conocida: En ese caso se aplica un razonamiento basado en la analogía de casos presentados donde se recuerdan los síntomas de roturas presentadas anteriormente y la operatoria con que fue posible su resolución. Se aplica el mismo procedimiento si los síntomas son los mismos, resolviéndose en la mayoría de los casos con éxito la falla presentada. En un número menor de ocasiones no se resuelve y es necesario enriquecer de forma creativa la experiencia de trabajo. En ese caso se aplica la variante que sigue en el párrafo siguiente. A medida que aumenta el número de instrumentos atendidos, el experto enriquece su experiencia, teniendo como resultado la cada vez más rápida solución a los problemas, mejorándose así la competitividad y calidad del servicio de reparación.
2. La falla es desconocida: Se aplica un método escalonado de análisis con tres niveles. El primer nivel de identificación consiste en determinar qué bloque está fallando. El experto debe conocer el modelo funcional del osciloscopio que se muestra en la figura 1. Dicha representación hace abstracción por el momento de toda la complejidad circuital del instrumento, orientándose a identificar qué función deja de realizarse y el bloque funcional con problemas.

2.1. El diagrama de la figura 1 es en esencia el modelo que el experto humano se representa en su mente como primer paso para iniciar un proceso de reparación. El conocimiento de este diagrama y las relaciones que existen entre sus bloques permite que el especialista acometa la reparación de forma metódica, aun en instrumentos desconocidos para él. En cada bloque del diagrama se oculta la complejidad de los circuitos que lo componen y se piensa en su función.

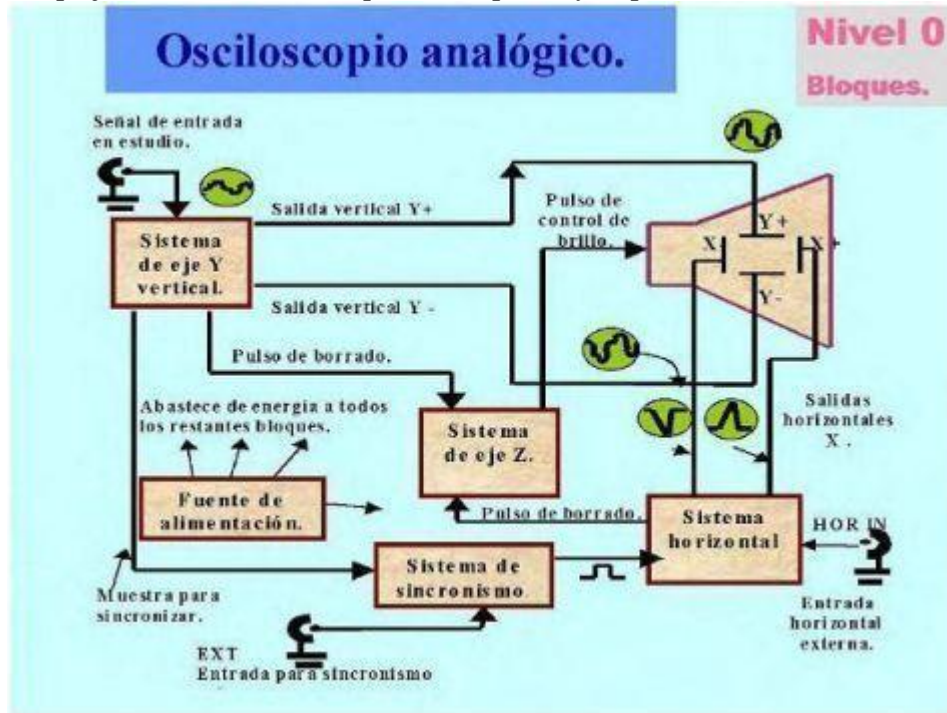


Figura 1: Diagrama de bloques básico de un osciloscopio de rayos catódicos.

2.2. En un segundo nivel de análisis se procede a identificar el sub-bloque funcional con problemas como se puede apreciar en la figura 2. Los sub-bloques son unidades funcionales más específicas dentro de cada bloque. Su complejidad es menor. Supóngase que se detectó un fallo en el bloque vertical. Dicho bloque se analiza entonces más detalladamente.

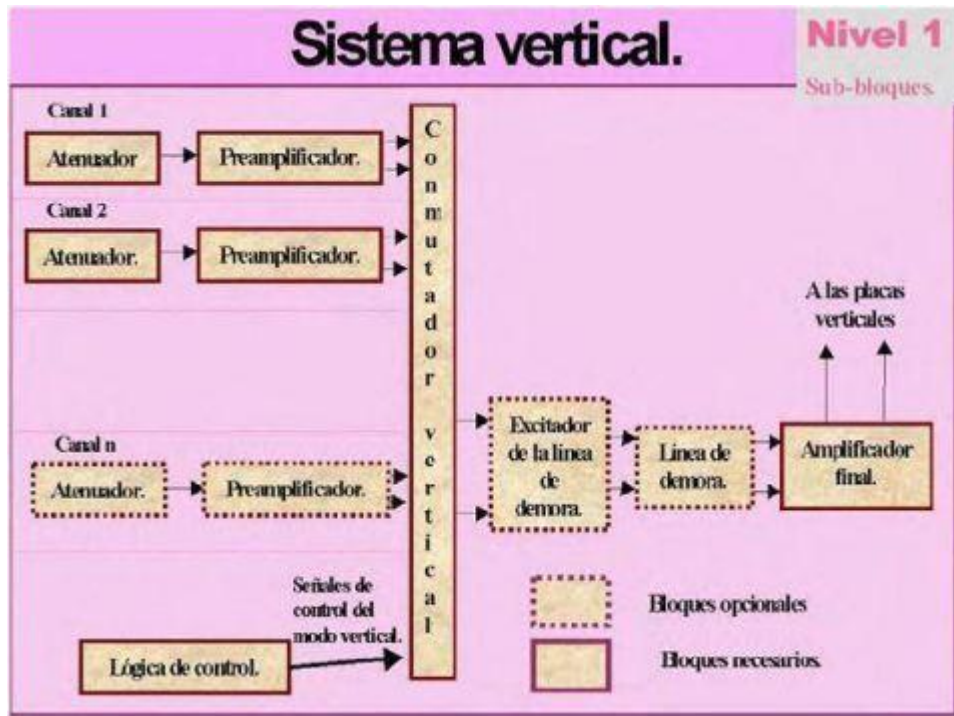


Figura 2. Diagrama de sub-bloques donde se muestra con más detalle la estructura del bloque vertical de la figura 1.

2.3. El tercer nivel de análisis consiste en identificar en el diagrama circuital el subbloque que causa el problema. El resultado de esto es el aislamiento de un circuito factible de analizar con los conocimientos convencionales de electrónica. En la figura 3 puede apreciarse a modo de resumen el procedimiento explicado.

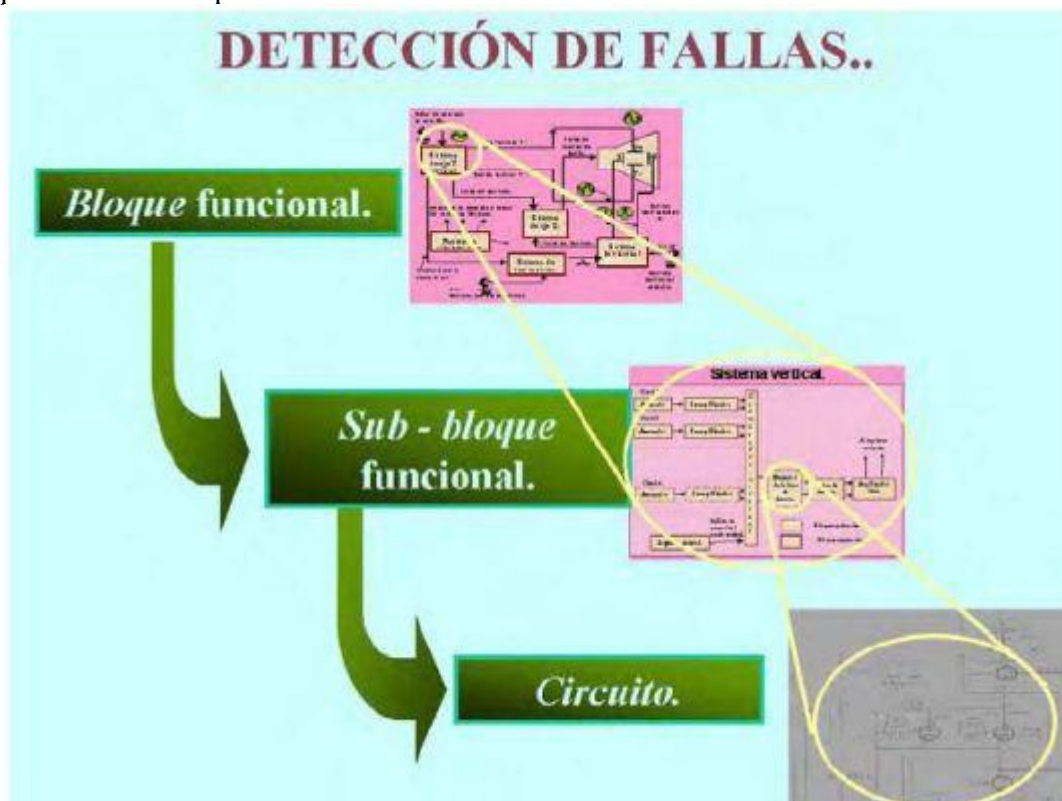


Figura 3. Niveles de análisis durante la reparación de un osciloscopio analógico.

Lenguaje experto Wucshell.

El lenguaje experto WUCSHELL fue desarrollado en la Universidad Central de las Villas, Cuba y permite escribir bases de conocimientos mediante reglas de producción de la forma *IF.THEN.ACTION*. Wucshell calcula la incertidumbre de las conclusiones a partir del grado de confianza que tengan los datos que manipula. De esta forma se brinda un elemento para estimar lo confiable que es la conclusión a que arribó el sistema experto y así puede aceptarse o descartarse.

El fichero de reglas para Wucshell está integrado por tres módulos opcionales de acuerdo con las características de la base de conocimientos y un bloque de acciones.

- Definición de variables externas.

En esta sección se definen las variables que la base de conocimiento debe buscar en una zona de memoria externa.

- Bloque de preguntas.

En el bloque de preguntas se utiliza la palabra clave *ask* para obtener las variables que se preguntarán. En cada pregunta se pueden definir opcionalmente las posibles soluciones con las palabras clave *domain* o *choice*, pues ellas garantizan que la variable tome solo uno de los valores especificados por ellas. Si no se utiliza ninguna de estas palabras, la variable puede tomar cualquier valor.

Una palabra clave muy importante es *Because*, porque su definición especifica una lista de elementos que serán mostrados en la pantalla cuando el usuario presione el botón de explicación de la pregunta. Se utiliza para explicarle al usuario, porque el S.E hace cierta pregunta. Definiendo un texto con *Because* de una pregunta, éste puede ser mostrado en la interfase oprimiendo el botón correspondiente. Con esto se satisface una exigencia del usuario del sistema experto, pues es difícil que responda preguntas que no entienda para que se hagan.

Ejemplo de una pregunta:

Asks

```
. . . .  
. . . .
```

```
Ask rampalin: 'Comprobar si el voltaje en los colectores de los  
transistores VT48,49 es una rampa sin deformación visible con  
polaridad opuesta en cada transistor.' +  
Si se introduce una onda cuadrada por el borne de entrada, la  
misma debe estar espaciada regularmente./n'+  
¿La onda se representa uniformemente?'
```

domain

```
'Sí', 'no'
```

because

```
'Se trata de determinar si hay deformaciones o alinealidades que  
son generalmente provocadas por la pérdida de la alta impedancia  
de las etapas que transportan la señal de diente de sierra./n',  
'Por ejemplo, si un transistor JFET o MOSFET se rompe y pierde  
su propiedad de alta impedancia de entrada, va a cargar la etapa  
anterior.'
```

```
. . . .  
. . . .
```

- Bloque de reglas.

En este bloque se sitúan las diferentes reglas de producción. Si se cumple alguna de ellas, se ejecutan las acciones especificadas.

Ejemplo de reglas:

Rules

```
. . . .
```

```

. . . . .
rule 2
if exclude problema and
in_af='No se cumplen ni 1 ni 2'
then problema:=' circuitos del preamplificador horizontal '
actions
display
' Posible fallo en ',problema,
'/n/n Ese circuito está construido con los transistores VT14,
VT16~VT19./n/n',
' ---> Se deben medir voltajes de trabajo de dichos
transistores./n/n',
' ---> Chequear que el control R14 no esté abierto. El voltaje en el
cursor/n',
' debe variar gradualmente sin saltos bruscos al girar.'
End;
. . . . .

```

• **Bloque de acciones.**

En este bloque se declaran las acciones que ejecutará la base de conocimiento al iniciar su corrida.

Ejemplo:

```

Actions
display
'/n/n/n/n/n A continuación se comprobará si existen
problemas/n',
' en el amplificador horizontal./n/n',
' El amplificador horizontal es el circuito que procesa señales que
se aplican a /n',
' las placas de deflexión horizontal del tubo de rayos catódicos
para conseguir /n',
' el movimiento del trazo en el eje horizontal./n/n'
find problema
display
'/n/n/n/n/n/n/n/n/n/n Se comprobó el
amplificador horizontal'
savefact problema
End.

```

En la figura 2 se puede apreciar la pantalla de diálogo del programa Wucshell con el usuario durante la obtención de datos.



Figura 2: Dos ejemplos de pantallas.

Sistema experto para la búsqueda de fallas en osciloscopios analógicos.

Se cuenta con un Sistema Experto basado en reglas de producción para el diagnóstico de fallas de Osciloscopios del tipo CI118A y se trabaja en el desarrollo de Bases de Conocimientos para otros modelos, los cuales combinan los conocimientos *privados* que poseen los especialistas y los conocimientos *públicos*, presentes en manuales de servicio y libros. El SE está constituido por el intérprete Wucshell y varias bases de conocimiento. Existe una BC que define la estrategia general de búsqueda y varias especializadas para ciertos bloques funcionales del instrumento que se nombran según su función: Brillo, Sincronismo, Circuitos del sistema horizontal, Circuitos del sistema vertical, Ajuste de parámetros horizontales, Ajuste de parámetros verticales, Calibrador, Fuente de bajo voltaje y Convertidor de alto voltaje. El objetivo del programa es encontrar la causa de la falla y para ello prueba todas las reglas que están establecidas en las BC. Al consultar el SE, se prevén tres situaciones distintas, a saber:

- 1 Que se encuentre la causa de la falla.
- 2 Que no encuentre la causa de la falla y entonces se le informa al usuario que no es posible dar respuesta a su problema porque no está en la B.C.
- 3 Que no se encuentre nada y en ese caso no hay evidencia de problemas conocidos.

Conclusiones

1. La metodología general para la búsqueda de fallas en osciloscopios tiene una gran utilidad en el aprendizaje de las técnicas de reparación y en la práctica laboral del especialista, porque al no concentrarse en los detalles de un modelo específico de instrumento, permite abordar la reparación de cualquier osciloscopio analógico tomando como base el conocimiento de los bloques funcionales del mismo y su interconexión.
2. Se dispone del programa experto SEMIM para búsqueda de fallas en osciloscopios analógicos que representa una herramienta adicional destinada a las consultas y al entrenamiento de estudiantes y profesionales que trabajen en el mantenimiento de equipos de medición.

3. El lenguaje experto Wucshell permite la creación, ampliación y modificación de las bases de conocimientos confeccionadas, con lo cual se garantizará que se pueda actualizar constantemente la experiencia obtenida durante la actividad práctica de los especialistas.

4. Se trabaja en la ampliación del sistema experto mediante el desarrollo de bases de conocimientos para otros modelos de osciloscopios existentes en la universidad y se planea extenderlo a otras líneas de equipos como multímetros digitales y generadores.

Bibliografía.

[1] M. Lezcano. “Apuntes para la utilización del Programa Experto Wucshell”. Facultad de Cibernética Matemática. Universidad de las Villas. (1998)

[2] E. Rich K. Knight. Inteligencia artificial. Segunda edición. Mc Graw – Hill (1994)

[3] Beijing Electronic Display Instruments Factory. Instruction Manual BS4341. (1990)

[4] Textronix Inc. The XYZ of oscilloscopes.(1997)

[5] Microsoft Corporation. Enciclopedia Encarta 99 (1999)

[6] M. Lezcano. Prolog y los sistemas expertos. Ponencia presentada en el Simposio de Ingeniería Eléctrica. (1999)

[7] Millman J. Microelectronics Capitulo XVII pag. 646-649

[8] Microsoft Corporation. Enciclopedia Encarta 99. 1999

18.3 ANEXO 3- SISTEMA EXPERTO PARA EL MONITOREO DE CONDICIONES EN MÁQUINAS ROTATIVAS.

SISTEMAS EXPERTOS MONITOREO DE CONDICIONES EN MÁQUINAS ROTATIVAS

L. Amendola, Ph.D

*Departamento de Proyectos de Ingeniería
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, (ESPAÑA)
T. +34 96 3877000 Ext. 85684 F. + 34 96 3879869
e-mail : luiam@dpi.upv.es ; luiqipmm@yahoo.es*

1. Marco teórico

Los avances de la monitorización han contribuido no sólo al mantenimiento predictivo de las instalaciones, sino también en la investigación de las causas de las averías y por consiguiente en el conocimiento profundo de la maquinaria.

Las pruebas y sucesos experimentales, han confirmado los modelos matemáticos que se habían establecido en muchos casos. Los beneficios de la monitorización on line de la vibración de las máquinas de cierta entidad se pueden enumerar en los siguientes:

- ❖ Reducción de pérdidas de producción o servicio.
- ❖ Rentabilidad, eficacia, seguridad y longevidad de las máquinas.
- ❖ Reducción de costes de mantenimiento (costes de horas extraordinarias).
- ❖ Inventario menor de piezas de repuesto).
- ❖ Programación más rigurosa de la carga de trabajo.

El análisis de vibración, pues es una de las técnicas más utilizadas en el diagnóstico de máquinas rotativas.

La monitorización de la vibración pasa por una adecuada selección de los sensores de lectura de la señal y de los puntos de implantación de estas medidas. Nuevas generaciones de equipos electrónicos combinados con la tecnología de la información que disponen de amplia memoria, procesadores de alta velocidad, alta calidad de gráficos, transmisión remota de datos, equipados con avanzado software basado en

el conocimiento de la mecánica, dinámica de fluidos y termodinámica proporcionan la capacidad de extraer información muy valiosa durante largos periodos de tiempo. La posibilidad de presentar la vibración en diferentes formatos interrelacionados, permite evaluaciones del comportamiento dinámico de la maquinaria que permitan detectar su estado de vida, dando temprano aviso de las anomalías de su funcionamiento y permitiendo por tanto, determinar las causas de defecto correspondiente.

Se han de tener en cuenta ciertos principios básicos para poder aplicar la metodología de diagnóstico de averías mediante monitorización continua:

- ❖ Conocimientos técnicos de mecánica de fluidos, transmisión de calor, mecanismos, resistencia de materiales, electricidad y teoría de máquinas.
- ❖ Conocimientos de las anomalías mecánicas en máquinas y sus síntomas.
- ❖ Monitorizar los parámetros adecuados que están ligados con posibles modificaciones en las condiciones de funcionamiento de las máquinas.
- ❖ Analizar datos de la vibración a través de diferentes formatos de su lectura, comparar resultados y comprobar con los modelos de predicciones analíticas.
- ❖ Estudiar los sucesos precedentes de la instalación y cualquier intervención o modificación que pueda haber influido en el comportamiento dinámico de las máquinas.
- ❖ Tomar decisiones fundamentales en el diagnóstico de la lectura de

vibraciones, tan rápidamente como sea posible.

- ❖ Conocimiento previo de cada máquina (geometría, peso, tipo de rodamiento, etc).

Otros parámetros imprescindibles para la interpretación de la lectura de vibraciones puede obtenerse de la respuesta del equilibrado de los rotores, que por otro lado siempre han de hacerse periódicamente y por tanto siempre estarán disponibles. Estos datos básicos son:

- ❖ Frecuencias naturales del sistema y modo de vibración del eje.
- ❖ Amortiguamiento efectivo del sistema.
- ❖ Factor de amplificación (grado de seguridad del sistema ante una inestabilidad del rotor).
- ❖ Relación carga/respuesta de vibración.
- ❖ Valores máximos de vibración aceptables.

La monitorización de la vibración de la máquina ha de ser interrelacionada con la monitorización del funcionamiento de la instalación y sus variables de proceso. La operación de la máquina responde a un comportamiento dinámico, y los datos de su proceso correspondiente ha de incluir información de gran importancia en la interpretación y diagnóstico del estado de vida de los componentes. Cambios en el modo de operación o en variables auxiliares (temperatura de cojinetes, presión de lubricación, consumo de energía, gases de combustión, etc) pueden representar la primera señal de alarma sobre problemas de vibraciones. Las vibraciones de las máquinas son, al fin y al cabo, manifestaciones de incorrectos funcionamientos que ocurren como respuesta a alteraciones de cualquier fuerza interna o modificaciones en la rigidez dinámica del sistema. Consecuentemente, ambos, proceso y vibración, deben ser monitorizados y almacenados sus datos para obtener así una información más rigurosa y acertada, constituyendo un archivo de datos que puedan dar lugar a un examen de la tendencia.

2 Aplicaciones de sistema experto para diagnósticos de máquinas rotativas basadas en la vibración

Los elementos esenciales de análisis del estado de la maquinaria se discuten con énfasis en su incorporación al sistema de análisis de vibración de la maquinaria computarizada. El sistema experto se usan eficientemente en muchos programas de monitoreo del estado de la maquinaria basada en la vibración.

Principio operacional: EADS (Expert Automated Diagnostic System) usa tres bases de datos de diagnósticos de máquinas automatizadas:

Base del Conocimiento de la Máquina (BCM). Contiene la información necesaria para que el sistema experto reconozca y defina los componentes y la configuración de cada máquina incluyendo la descripción de la máquina, su velocidad rotativa, y los parámetros de frecuencia forzada así como el número de dientes, piñón, aspas de la bomba etc.

Base de Datos del Espectro (BDE): Es una colección de espectros de máquinas representativas relativamente sanas. El espectro de varias máquinas iguales se puede combinar así en un espectro promedio, el cual se puede usar como una línea base exacta, la cual ha sido colocada por la misma máquina. Esta base de datos dice exactamente al sistema experto qué clase de firma de vibración se espera para cada tipo específico de máquina que se está ensayando.

Base Datos Análisis de Espectro (BDAE): contiene la acumulación de conocimientos de los expertos en el campo del diagnóstico de máquinas. Las normas (reglas) del sistema experto, dicen cómo interpretar las desviaciones de los picos espectrales individuales en el espectro corriente.

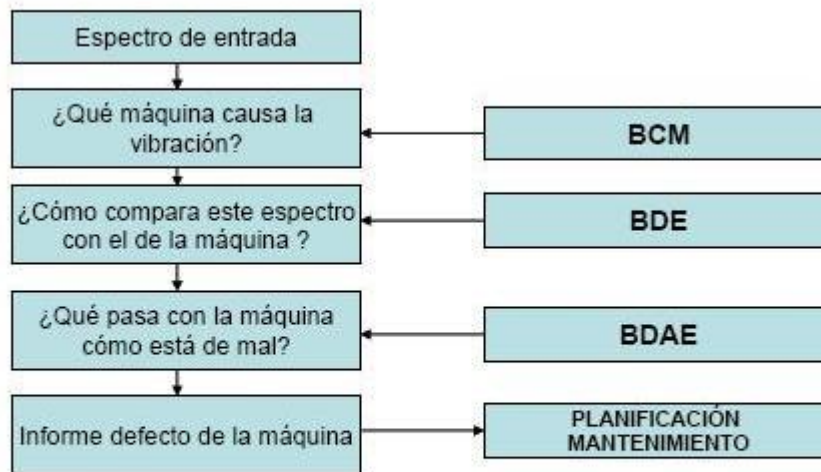


Figura 1. Sistemas de Flujo de Datos

La figura 1, ilustra la aplicación de las 3 principales bases de datos en el proceso de análisis de vibración. La primera y segunda base de datos son específicas, nuevas y diferentes para cada usuario particular y pueden ser definidas y ajustadas para optimizar continuamente el funcionamiento del sistema.

BDAE, sin embargo, es un juego de reglas expertas que son globalmente aplicables. Es ajustable, sin embargo, cualquier usuario del sistema individual puede crear o modificar alguna o todas las normas para la optimización del funcionamiento.

Por tanto el uso de un sistema experto automatizado para diagnósticos de máquinas es un medio eficiente para obtener el análisis de condiciones exacta y fiable de la máquina, sin el uso de personal entrenado y sin la necesidad de sesiones de preguntas y respuestas con el usuario,

La Tecnología de la Información en el Diagnóstico de Fallos

EL monitoreo por vibración, como parte del mantenimiento predictivo, llega a ser

rápidamente una herramienta inestimable para el uso en el diagnóstico de máquinas rotativas críticas.

La vibración como un indicador de salud de la máquina.

La vibración es probablemente el mejor parámetro del operador para juzgar las condiciones dinámicas así como el desequilibrio, junto a otras anomalías comunes como la mala alineación de equipos, los cuáles se manifiestan frecuentemente como características de vibración. Estas características dan información significativa desde la cuál el diagnóstico exacto se puede hacer para determinar las condiciones de la máquina rotativa crítica.

Varias normas se han desarrollado para conocer límites de vibración aceptables para grupos específicos de máquinas.

La medición de vibración implica básicamente la elección exacta de los parámetros a ser medidos, el tipo de

instrumentación y finalmente las características que pueden ser estudiadas.

Normalmente los tres parámetros de vibración que se usan son: la amplitud, la frecuencia y la fase de la señal de vibración. Otra información útil incluye el espectro de vibración y sus parámetros derivados.

Sistema experto

Los sistemas expertos usados para el análisis por vibración en equipos rotativos tales como ventiladores de aire, rotores, cajas de cambio, etc., y dan un diagnóstico basado en medidas de vibración.

El conocimiento base de datos consiste en la severidad de los límites de diversos parámetros para diferentes tipos de máquinas, diferentes defectos comunes (algunos no tan comunes) que pueden ocurrir en las diferentes máquinas, y la frecuencia de componentes para la misma.

En adición, los detalles físicos y operacionales (así como de velocidad, carga etc) de las máquinas también se incluyen cuando un sistema es hecho a la medida para una industria específica.

En este sentido, el usuario no necesita introducir los detalles rutinarios de las máquinas que se están monitorizando periódicamente. Se pueden poner al día o modificarse como se requiera.

Desde un PC se puede hacer a la medida para encontrar los requerimientos específicos, los límites severos que se han puesto para diferentes máquinas para monitorizarlas en un periodo de tiempo. Se usa en lugar de dar valores genéricos en los niveles como asesoramiento.

3. REFERENCIAS

[1] B.K.N. Rao (Ed.), Handbook of Condition Monitoring, Hardcover, Published by: Elsevier Advanced Technology, Publication Date: November 1, 1996, ISBN: 1856172341

[2] [Alexei Barkov](#), VAST, Optimization of Monitoring and Diagnostics Methods for Rotating Machines using Vibration and Noise Measurements, Inc., 22, Rozenshteina str., St. Petersburg, 198095, Russia

[3] N. Baba, L.C. Jain and R.J. Howlett, Frontiers in Artificial Intelligence and Applications Volume 69, Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems & Allied Technologies

[4] G. Diana, Diagnostics of Rotating Machines in Power Plants: Proceedings of the Cism/Iftomm Symposium October 27-29, 1993 Udine, Italy (Cism Courses and Lecture)

[5] Trevor M. Hunt, Condition Monitoring of Mechanical and Hydraulic Plant: A Concise Introduction and Guide.

[6] Evelio Palomino Marín, Elementos de Medición y Análisis de Vibraciones en Máquinas Rotativas, Latinas Editores, Bolivia.

Universidad Politécnica de Valencia España, Dpto. Proyectos de Ingeniería, 23 años de experiencia en la industria del petróleo, gas, petroquímica y empresas de manufactura, desempeñado posiciones Técnicas, Supervisoras y Directivas en Proyectos de Ingeniería, Mantenimiento, Tecnología de la Información y Desarrollo de Negocios

18.4 ANEXO 4- FUZZY NONLINEAR REGRESSION MODEL FOR RAILWAYS RIDE QUALITY

FUZZY NONLINEAR REGRESSION MODEL FOR RAILWAYS RIDE QUALITY

Jairo Maya Toro
Researcher Teacher
EAFIT University
Medellín – Colombia
jmaya@eafit.edu.co

Sophie Hennequin
Asistant Profesor
National Engineering School of Metz (ENIM)
Metz-Francia
hennequin@enim.fr

Dorian W Raigosa M.
Master Student
EAFIT University
Medellín – Colombia
draigosa@eafit.edu.co

Leonel Castañeda Heredia
Researcher Teacher
EAFIT University
Medellín-Colombia
lcasta@eafit.edu.co

ABSTRACT

The portable diagnosis system - SPD - evaluates the safety and ride quality aspects of the railway vehicles and the technical condition of the rail-vehicle interface. The objective of this article is to estimate the nonlinear regression model associated to the ride quality or motion behaviour, by applying fuzzy clustering algorithms on the geometric data obtained from the technical condition of the railway-vehicle interface and the measuring of the quasi-static lateral acceleration y_{qs} in different vehicles. The performance will be evaluated by comparing the measured acceleration y_{qs} with the acceleration calculated with our model y_{qsM} for 15 different vehicles. The obtained results will be then compared with the results of the multiple linear regression model used previously for the same purpose [16].

Index terms: Fuzzy clustering, railways ride quality, fuzzy nonlinear regression.

1. INTRODUCTION

The ride quality on the passenger railways vehicles, according to the UIC518¹ from the International Union of Railways, has relation with the value for acceleration y_{qs}^* , this normative says that for ride quality it should has a value limit of $1,5 m/s^2$ [7]. Due to the high cost involved in the measuring of the acceleration y_{qs}^* to each vehicle, it is necessary to obtain a tool (model) that allows to predict the behaviour of the acceleration y_{qs}^* according to the measured the 23 geometric variables, which are routinely measured in the normal preventive maintenance routine of the railway, without the need of making a y_{qs}^* measuring process. Many of the traditional method used to solve this problem are based on global models like Polynomials (ARMA, ARX, NARMX, NARMAX) [4],[6],[12], radial basis functions and neural network [1],[2],[3],[5], fuzzy clustering [6],[13], among others some of then used

¹ Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour-Safety-Track fatigue – Ride quality.

in similar railways application in the world [20],[21].

The fuzzy clustering is to approximate a nonlinear regression problem by decomposing into several local linear models; this approach has advantages in comparison with global nonlinear models [13]. The model structure is easy to understand and interpret, both qualitatively and quantitatively. Besides, the approach has computational advantages and lends itself to straightforward adaptive and learning algorithms. To show the feasibility of approach, we will compare the obtained results using fuzzy clustering with the Babuska toolbox [13], with the results obtained with the multiple linear regression model used previously for the same purpose [16].

This article is part of the development of SPD (Portable Diagnostic System)[16],[22],[23],[24] [17],[18],[19], which consist of the measurement of the vehicle's variables allowing the identification of the technical condition for the vehicle-railway interface.

The paper is organized as follows. In section 2, we will introduce the element for the regression used in the SPD system. In section 3 we will review the nonlinear regression; section 4 will detail the fuzzy clustering methodology and sections 5 and 6 will show the results, comparison with NRL (Multiple nonlinear regression)[16] and conclusions respectively.

2. STUDIED SYSTEM

The Metro system of Medellín was created the 31st of May, 1979 by the Medellín municipality and the Antioquia Department, allowing the creation of the Metro de Medellín Company.

Figure 1. Metro System of Medellín



Metro system of Medellín photographic file

Description of the railroad:

- **Line A:** Paralell to the Medellín River and with a length of 23,2 km, it's provided with 19 stations in direction North to South.
- **Line B:** It starts from the centre of the city in the San Antonio B Station and goes west direction. It has a length near to 5,6 km and it counts with 7 stations.
- **Linking Line:** it connects the two lines described above and has a length of 3,2 km.
- **Line K:** It is a cable transport system that connects the Acevedo Station. It consists of 4 stations and has a length of 2,4 km.

In order to extract the data, both the estimators given by the standard UIC 518 and the geometric variables, the complete railroad of the train is taken and the measuring points were classified by sections, just as the standard UIC 518 recommends. The three zones proposed by the standard are considered: tangent tracks, large radius curve tracks and short radius curve tracks; however, the length of the sections that compose the different zones was adapted according to the distribution of the Line A road of the Metro system. The considered lengths were:

- Tangent track: 160 m
- Large radius curve track: 70 m
- Short radius curve track: 70 m

2.1. Data acquisition

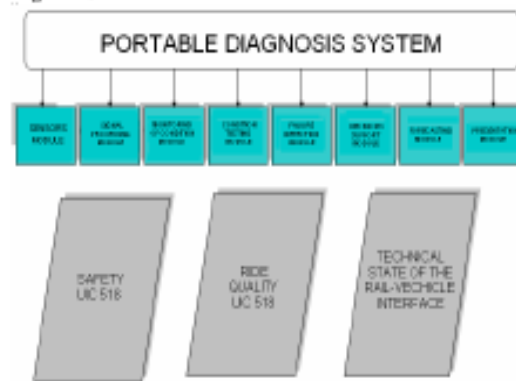
The Portable Diagnostic System - SPD is a unique development for the railway systems, which apart from evaluating safety, ride quality and monitoring the condition of the geometric parameters of the track - vehicle interface, also allows to carry out the multidimensional monitoring of the condition and to determine the generalised failures of passenger vehicles of the Metro de Medellín [16], [22],[23],[24].

To develop this diagnosis tool, different methodologies were used, grouping several modern and effective methods in the diagnosis tasks, which go from the selection of measurement points, through the method of evaluation of the UIC 518 standard until the utilization of an optimised forecast method [7],[16], [22],[23],[24].

The system is composed by eight modules: sensors, signal processing, monitoring of the condition, condition testing, incipient failures detection in the wheel-rail interface, decisions support, forecast and

presentation. In figure 2, the SPD module structure appears

Figure 2. Module of the SPD



The obtained signal by the SPD allows calculating the lateral and longitudinal forces that are generated in the vehicle along the track which are necessary for the safety evaluation.

The UIC 518 standard describes the experimental procedures to follow in order to carry out the motion tests and the analysis of the results, in terms of quality and rolling from the point of view of the dynamic behaviour in relation to the safety, railroad wear and motion behaviour (ride quality) with the purpose of an approval for the international railway traffic.

Table 1 presents the different estimators considered by the standard. It was necessary to acquire acceleration and forces signals in different parts of the train to calculate the estimators [5].

Table 1. Estimators for safety, ride quality and fatigue track according to the UIC 518 Standard.

Estimator	Description	Units	Limit Value
SY2m	Sum of guiding forces for axle	kN	66.7
SY2m (99,85%)	Sum of guiding forces for axle. Percentile 99.85%	kN	66.7
SY2m (0,15%)	Sum of guiding forces for axle. Percentile 0.15%	kN	66.7
eSY	Weighted r.m.s of Sum of guiding forces per axle.	kN	33.3
Yqt	Quasi-static force between wheel and rail	m/s ²	60
y ^{*q}	Lateral acceleration in the vehicle body	m/s ²	2.5
y ^{*q} (99,85%)	Lateral acceleration in the vehicle body. Percentile 99.85%.	m/s ²	2.5

Estimator	Description	Units	Limit Value
y ^{*q} (0,15%)	Lateral acceleration in the vehicle body. Percentile 0.15%.	m/s ²	2.5
y ^{*q}	Weighted r.m.s of Lateral acceleration in the vehicle body.	m/s ²	0.5
y ^{*qt}	Quasi-static acceleration in the vehicle body.	m/s ²	1.5
z ^{*q}	Vertical acceleration in the vehicle body.	m/s ²	2.5
z ^{*q} (99,85%)	Vertical acceleration in the vehicle body. Percentile 99.85%.	m/s ²	2.5
z ^{*q} (0,15%)	Vertical acceleration in the vehicle body. Percentile 0.15%.	m/s ²	2.5
zz ^{*q}	Weighted r.m.s of Vertical acceleration in the vehicle body.	m/s ²	0.75
1	Cast deficiency	mm	150

Because this article is limited to the ride quality evaluation, the estimator to use will be the acceleration y_{qt} . According to the UIC 518 standard [7], the limit value of this acceleration of $1,5 \text{ m/s}^2$, defines the ride quality or motion behaviour of the vehicle.

This estimator is obtained from the lateral acceleration signal, taken from the passenger's box (vehicle). These measurements are filtered by a digital filter, topology Butterworth, order 8 and cutting frequency of 20 Hz.

2.2. Geometric variables

Among the current maintenance routines of the railway system, different geometric variables that give an idea of the technical condition of the rail, are measured. These are presented in Table 2.

Table 2. State condition variables

Geometric Variable	Description	Units	Limit Value
X1	Equivalent conicity with standard deviation of 1.25 under the UK method.	NA	
X2	Equivalent conicity with standard deviation of 2.5 under the UK method.	NA	
X3	Equivalent conicity with standard deviation of 3.75 under the UK method.	NA	
X4	Maximum speed vehicle	km/h	80
X5	Standard deviation of the vertical alignment.	mm	2.3

X6	Standard deviation of the horizontal alignment.	mm	1.5
X7	Curv deficiency	mm	150
X8	Curve radius	m	0
X9	Horizontal alignments	mm	3
X10	Diferencia de altura entre la cabeza del hilo alto y bajo	mm	3
X11	Vertical alignments	mm	10
X12	Gap between the internal rail faces	mm	3
X13	Synthetic coefficient of the railroad quality.	mm	0
X14	Vertical wear of the head rail for the high rail (east-south)	mm	12
X15	Vertical wear of the head rail for the high rail (west-north)	mm	12
X16	r.m.s of the corrugation for the high rail for a wave length between 50 and 100 mm.	mm	10
X17	Excess percentage for the high rail for a wave length between 50 and 100 mm.	%	50
X18	r.m.s of the corrugation for the high rail for a wave length between 100 and 300 mm.	mm	20
X19	Excess percentage for the high rail for a wave length between 100 and 300 mm.	%	50
X20	r.m.s of the corrugation for the low rail for a wave length between 50 and 100 mm.	mm	10
X21	Excess percentage for the low rail for a wave length between 50 and 100 mm.	%	50
X23	r.m.s of the corrugation for the low rail for a wave length between 100 and 300 mm.	mm	20
X24	Excess percentage for the low rail for a wave length between 100 and 300 mm.	%	50

3. PRINCIPLES OF NONLINEAR REGRESSION.

Generally, fuzzy systems are approximations of functions. Because of this, they can also be used in nonlinear regression problems. The nonlinear regression is a modelling of the static dependence of the answer of a variable called regressor, where:

$y \in Y \subset \mathfrak{R}$, is a regression vector,
 $x = [x_1, x_2, \dots, x_p]$, over the $X \subset \mathfrak{R}^p$ domain. The elements of the regression vector can be called regressors and the X domain can be called regressor space. The system generated by the data can be described by:

$$y \approx f(x) \quad (3.1)$$

The deterministic function $f(\cdot)$ captures the dependence of y in x , and the symbol \approx reflects the characteristics of y that are not exact in function of x . The objective of the regression is to use the data in order to build a function $F(x)$ as an approximation to $f(x)$ not only because of the data, but because of the domain itself. The definition of a reasonable approximation depends on the purpose for which the model is build. If the objective of the model is to obtain predictions of y , accuracy must be the most relevant criteria. The accuracy insufficiency is usually known as the integral error over the domain.

$$I = \int_x \|f(x) - F(x)\| dx \quad (3.2)$$

Generally, this error can not be computed, since the value of f is only known with the availability of the data. However, the average of the error prediction of the available data is often used

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|f(x_i) - F(x_i)\| \quad (3.3)$$

Where N is the number of data in the sample.

Apart from the prediction accuracy, the objective can also be to obtain a model that can be used in order to analyse and understand the real properties of the data generator system. The potential of the fuzzy models is that they describe the systems as a collection of simple local sub-models expressed by rules. The rules can be formulated using natural language, which is more understandable than a mathematical language. The rules can also be combinations of analytical models commonly used in the control field of engineering, like the local linear models in Takagi-Sugeno [12].

3.1. NONLINEAR REGRESSION MODEL

The input of our model are the 23 geometric variables of the rail state and with them, the modelled acceleration Y_{qmM} is calculated.

An arrangement is conformed having a line for each one of the n geometric variables measured for each section, and a column for each one of the N sections. This arrangement is called matrix of observation X (regressor space).

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1N} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nN} \end{bmatrix}$$

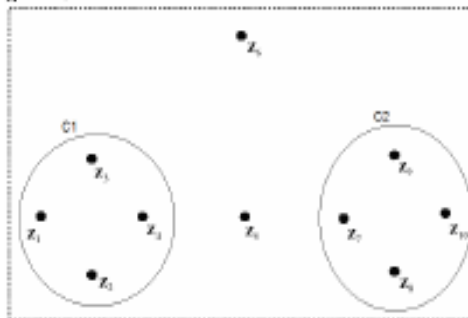
Traditionally, the clustering terminology defines the columns of the matrix of observation X as characteristics or attributes, while the lines are called patterns or objects.

4. FUZZY CLUSTERING LOGIC

It is defined as *cluster*, the sub-set of data that are more similar between them than with other data from another sub-set.

There are different types of data association or clustering, one of the most popular is the "Hard clustering" which refers to grouping the data in specific clusters mutually exclusive (see Figure 3), meaning that a data belongs only to one cluster and not to several clusters at the same time. In figure 3 the data z_5 could belong to both clusters c_1 and c_2 , this data is not had into account when using the Hard cluster.

Figure 3. Data set



(Delf center for System, TU Delft, BABUSKA. R)

It is reasonable to think that in the frontier of two clusters c_1 and c_2 there are some points that have a degree of belonging in both cluster. The algorithm *c-means* (Bezdek in Jang, 1997) allows that each point belongs to a cluster with certain degree of belonging, so each point belongs to several clusters. This makes

the fuzzy clustering, in some real situations, to be more natural than the Hard clustering.

4.1. Partition Fuzzy

The objective of the clustering is to divide the data set $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_N\}$ in c clusters ($2 \leq c \leq N$), that partition $U = [u_k]$, where u_k is the degree of belonging of the i to the cluster k . U represents a fuzzy partition if the points fulfil the following conditions:

$$u_k \in [0,1] \quad 1 \leq i \leq c, 1 \leq k \leq N, \quad (4.1.1)$$

$$\sum_{k=1}^c u_k = 1 \quad 1 \leq k \leq N \quad (4.1.2)$$

$$0 < \sum_{k=1}^N u_k < N \quad 1 \leq i \leq c, \quad (4.1.3)$$

Defining the fuzzy partition space as:

$$M_c = \left\{ U \in \mathfrak{R}^{n \times c} \mid u_k \in [0,1] \forall i,k; \sum_{k=1}^c u_k = 1 \forall k; 0 < \sum_{k=1}^c u_k < N, \forall i \right\}$$

4.2. Algorithm Fuzzy C-Means

There are different algorithms for fuzzy clustering, the most used is the "C-Mean" algorithm. This algorithm makes the data partition minimizing the objective function [6]:

$$J(Z;U,V) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^N u_k^m d_k^2 \quad (4.2.1)$$

Where:

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_N\} \quad (4.2.2)$$

Is the data set to classify.

$$U = [u_k] \in M_c \quad (4.2.3)$$

Is the partition matrix Z .

$$V = [v_1, v_2, \dots, v_c], \quad v_i \in \mathfrak{R}^n \quad (4.2.4)$$

Is the centre vector (clusters) to find.

$$d_k^2 = \|z_k - v_i\|^2 \quad (4.2.5)$$

Is the Euclidian norm, distance from the data to the center of a cluster.

$$m \in [1, \infty)$$

Is an exponent that determines the fuzziness of the obtained clusters.

The steps of the algorithm are:

- To select a belonging matrix
- To start the number of clusters
- To calculate the centroid of the clusters,

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^N u_{i,k}^m z_k}{\sum_{k=1}^N u_{i,k}^m} \quad (4.2.6)$$

- To calculate the Euclidean distance
- $$d_k = (z_k - v_i)^T (z_k - v_i) \quad (4.2.7)$$

- To update the belonging matrix

$$u_k = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{d_k}{d_j} \right)^{\frac{1}{m-1}}} \quad (4.2.8)$$

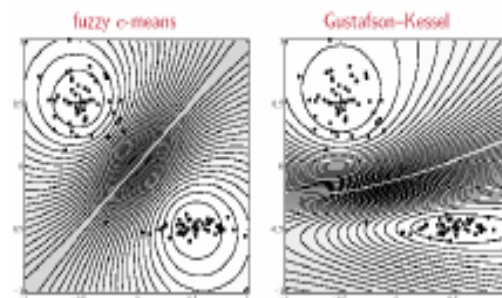
The equation (4.2.6) gives a value v_i that is the weighted average of the data belonging to a cluster, where the weights are the belonging functions.

This algorithm presents the following disadvantages:

- The final results depend on the final partition.
- The number of cluster is defined at the beginning of the algorithm
- The Euclidean distance method allows detecting only spherical clusters.

This very last disadvantage is a drawback, because the most ideal shape of data grouping is given by an ellipse, so the most appropriated algorithm is the one called "Gustafson-kessel", because this one looks for hyper ellipsoids clusters, which detect very well the quasi-linear behaviour of the data.

Figure 4. Clusters of different shape



4.3. Gustafson-kessel (GK) Algorithm

This algorithm is found among the adaptive distance algorithms. This one extends the fuzzy c-means by choosing a different norm B_i for each cluster instead of keeping it constant.

$$d_{\mathcal{B}}^2 = (z_k - v_i)^T B_i (z_k - v_i) \quad (4.3.1)$$

Where B_i are the possible optimisation matrixes of the objective function, and correspond to the covariance of each cluster.

Then, the objective function is defined as follows:

$$J(Z; U, V) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik} d_{\mathcal{B}_i}^2 \quad (4.3.2)$$

In order to obtain a viable solution, B_i must be limited somehow. In this case, we will keep its volume constant by fixing the determinant of B_i .

$$B_i = [\rho_i \det(F_i)]^{\frac{1}{2}} F_i^{-1} \quad (4.3.3)$$

Where F_i is the covariance matrix for each cluster.

The GK algorithm fits with the purpose of identification because it has the following characteristics:

- The cluster dimension comes limited by the measure of the distance and by the definition of the clusters prototype as a point.
- In comparison with other algorithms, GK is relatively insensitive to the initialization of the partition matrix.

Once we have the groups of data, the next step is to derivate the interference rules which identify a fuzzy model. To achieve that, there are different types like:

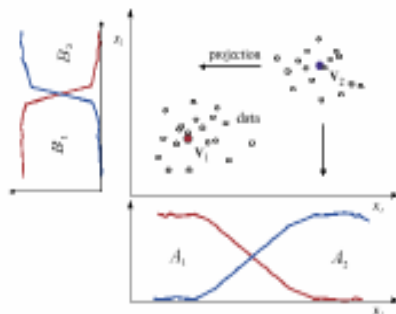
Mamdani: Fuzzy rules with fuzzy antecedents and fuzzy consequents.

Takagi-Sugeno (TS): Fuzzy rules with fuzzy antecedents and consequents that could be expressed in a simple way like a first order linear model[12].

Because the TS fuzzy model is an effective tool for the approximation of nonlinear systems based in the information of inputs and outputs through interpolation of the local linear models, which for this case are determined by the cluster, we use this TS model in the solution of the identification of the model we are looking for.

The solution consists of projecting the belonging of the obtained cluster in the desired space (Figure 5), thus obtaining belonging functions from the cluster.

Figure 5. Extraction of rules by fuzzy clustering



(Delft centre for System, TU Delft, BABUSKA R)

4.4. Takagi-Sugeno Model

In the Takagi-Sugeno model, the consequent rules are function of the inputs:

$$R_i : \text{If } x \text{ is } A_i \text{ Then } y_i = f_i(x), i = 1, 2, \dots, K \quad (4.4.1)$$

Where $x \in \mathfrak{R}$ is the input variable (antecedent), A_i is a multidimensional fuzzy set (cluster), y_i is the output variable (consequent), R_i is the i th rule and K is the number of rules of the rules set.

The consequent function can be linearly expressed as:

$$y_i = a^T_i x + b_i \quad (4.4.2)$$

(4.4.2) in (4.4.1):

$$R_i : \text{If } x \text{ is } A_i \text{ Then } y_i = a^T_i x + b_i \quad (4.4.3)$$

Given the outputs of the individual consequents y_i , the global output and the Takagi-Sugeno model

(defuzzyfication) is calculated by:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^K \beta_i(x) y_i}{\sum_{i=1}^K \beta_i(x)} \quad (4.4.4)$$

Where β_i is the commitment degree of the antecedent of the i th rule, calculated as the belonging degree of x in the interior of the A_i cluster:

$$\beta_i(x) = \mu_i(x) \quad (4.4.5)$$

Normalising

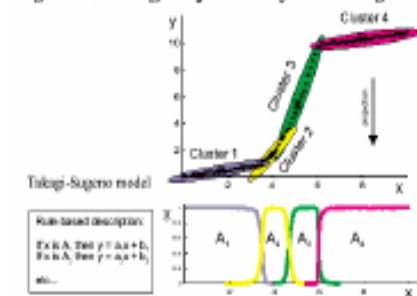
$$h_i(x) = \frac{w_i(x)}{\sum_j w_j(x)} \quad (4.4.6)$$

So the TS model could be interpreted as a quasi-linear model with dependence on the input x parameter.

$$y = \sum_{i=1}^K h_i(x) \cdot (a^T_i \cdot x + b_i) \quad (4.4.7)$$

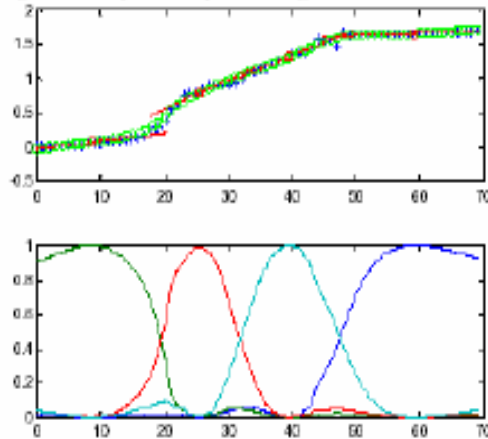
Figures 6 and 7 show an example of a function $y = f(x)$, represented by four TS rules. The antecedent of each rule defines a valid zone (fuzzy) for the correspondent linear model of the consequent. The global output function y is calculated through the weighting of the local linear models.

Figure 6. Takagi-Sugeno fuzzy clustering



(Delft centre for System, TU Delft, BABUSKA R)

Figure 7. GK y TS fuzzy clustering



5. NUMERICAL RESULT

During this work, the toolbox developed by the professor Robert Babuska [13] from the Delft Centre for System and Control was used. This tool was developed to be worked on MATLAB.

Once the information is collected from the matrix of observations X , is taken to a pre-processing that consists in centering the matrix.

Figure 8. Normalization of a matrix

$$\begin{bmatrix} z_{11} & \dots & z_{1j} & \dots & z_{1k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{i1} = \frac{x_{i1} - \bar{x}_1}{s_1} & \dots & z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} & \dots & z_{ik} = \frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{s_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{n1} & \dots & z_{nj} & \dots & z_{nk} \end{bmatrix}$$

(matrix general)

Where \bar{x} is the measure of each variable
 S is the standard deviation.

The quality of the model is evaluated by calculating the average error (equation (2.3)), its equivalent in the used toolbox, corresponds to the percentile variance accounted (VAF)[13], between the real and the estimated data.

This coefficient is obtained between two signals:

$$VAF = 100\% \cdot \left[1 - \frac{\text{var}(y1 - y2)}{\text{var}(y1)} \right] \quad (5.1)$$

Where the value of VAF will be 100% if both signals are equal. If the values are quite different, the value of VAF will tend to zero.

For each vehicle, the following procedure was followed:

- The matrix is normalised.
- The matrix is divided into two sections, one for the identification of the model and the other to carry out the verification of the obtained model.
- The real acceleration with the obtained model by multiple linear regression was plotted [14],[15]. This was also used to determine the ride quality model [16], because of that it will be a reference to validate our results and the obtained result by the fuzzy clustering method.
- The VAF coefficient is calculated to determine the accuracy of the model compared with the real data.

The best results were obtained using the toolbox with the following parameters:

FM.c = 12; % number of clusters
 FM.m = 2.8; % fuzziness parameter
 FM.tol = 0.1; % termination criterion
 FM.ante = 2; % 2 - projected MFS
 FM.cons = 2; % 2 - weighted LS

Where FM is the defined structure by Babuska in MATLAB for the parameters of the toolbox.

In table 3, we present the obtained results with the fuzzy nonlinear regression model and the obtained results with the multiple regression model [16].

Table 3. Results

Item	Unidad	Regresión Lineal(%VAF)	Fuzzy Clustering(%VAF)
1	05	76.16	100
2	09	97.52	100
3	10	80.01	95.53
4	12	86.89	100
5	13	87.03	99.17
6	15	78.69	100
7	17	87.19	100
8	19	92.66	100
9	22	86.81	100
10	24	94.7	100
11	34	84.93	100
12	35	70.86	99.07
13	38	77.83	100
14	40	94.15	92.28

15	41	92.5	92.6
----	----	------	------

Figure 9 shows the measured data of the acceleration and the model output data obtained by fuzzy clustering for the vehicle 05. It is noticeable that in the table of results there is a VAF of 100%, that corresponds with the line at 45° of the figure and besides produced faithfully the acceleration as it is shown in figure 10.

Figure 9. Plot Yqst vs. Output fuzzy model Vehicle 05.

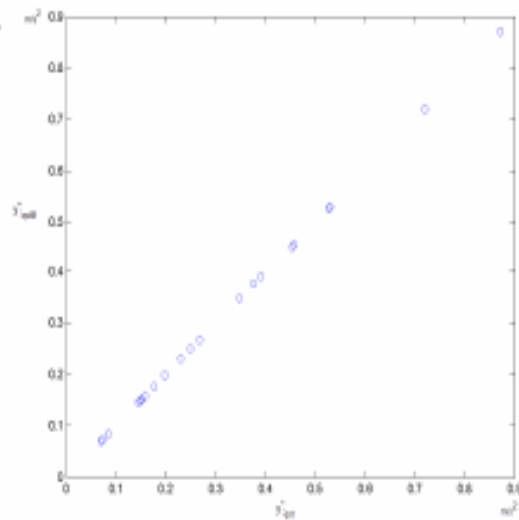
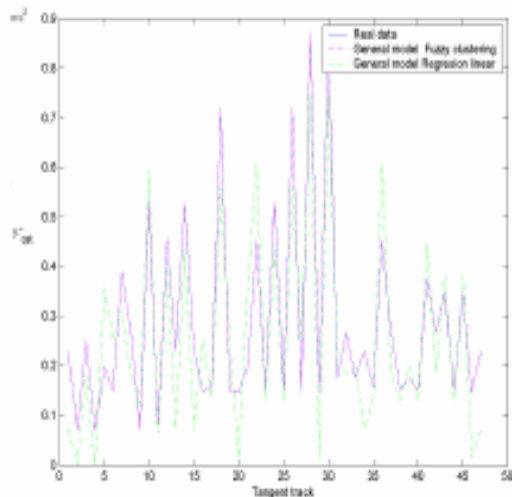


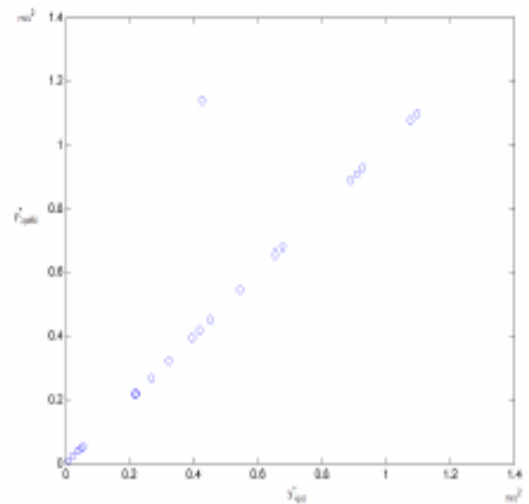
Figure 10. Real acceleration curve vs. Model curve Vehicle 05.



In table 3 it is observed that the worst VAF coefficient corresponds to the vehicle 40, with a VAF of 92.28. If we plot the data (see figure 12) it can be clearly observed which model did not estimated well a data, leaving this out of the

comparative graphic of 45° (Figure 11). This could be because of tuning problems of the model, either in the sensors installation, different geometric conditions of the rail or the equipment capacity, etc.

Figure 11. Plot Yqst vs. Fuzzy model output, Vehicle 40



To obtain a general model, all the samples of the 15 vehicles in a matrix were taken, and then a pre-processing consisting of interchanging the files randomly was made. After that, the same process made to the vehicles individually was made and the results were a VAF of 97.35. It can be graphically observed in figures 13 and 14.

Figure 12. Real acceleration curve vs. Model curve, Vehicle 40.

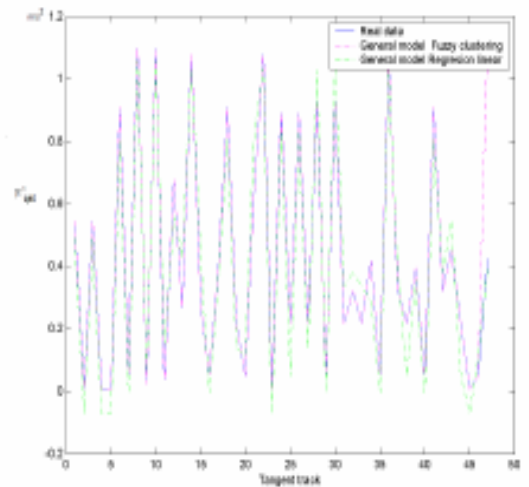


Figure 13. Plot Yqst vs. Fuzzy general model output.

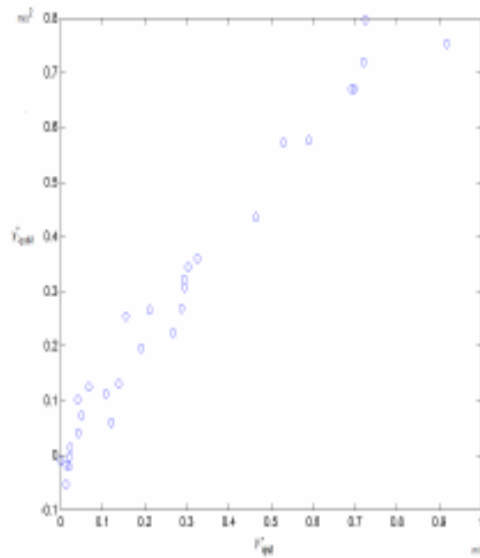
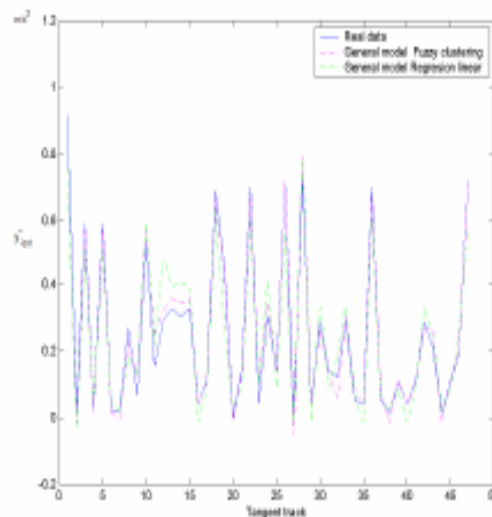


Figure 14. Real acceleration curve vs. General model Curve



6. CONCLUSIONS

In this article, the main Fuzzy clustering aspects for the model identification were revised.

Although the obtained results with the linear multiple regression are satisfactory, comparing the obtained results, we find that the quality of the fuzzy model is better in 14 out of 15 analysed vehicles, and only one vehicle of the model of linear multiple regression is better than with the fuzzy model.

We showed that Fuzzy clustering is a good tool to approximate nonlinear functions, specially the Takagi-Sugeno model.

This regression model can be integrated into the process for decision support in maintenance rail-vehicle interface. To reduce the cost associated in the maintenance work, human resources and increase the reliability of system.

Due to the reasons explained before, when it comes to identify a nonlinear model, we recommend the fuzzy model to be used in future implementations among the SPD.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

We would finally like to express deep gratitude to EAFIT University, COLCIENCIAS and the Medellín Metro Company for making possible the execution of this document.

REFERENCES

- [1] DE VEAUX R, SCHUMI J, SCHWEINSBERG J, UNGAR L. Prediction intervals for Neural Networks via nonlinear regression. *Technometrics*, vol.40, Issue 4, 1998 pag 273-282. ISSN:0040-1706 USA
- [2] HORNIK K, STINCHCOMBE M, WHITE H. Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks* Vol. 2, Issue 5, 1985 pag 359-366. ISSN: 1045-9227
- [3] MHASKAR H.N. Neural networks for optimal approximation of smooth and analytic functions. *Neural computation*, vol 8, 1996 pag 164-177. ISSN:0899-7667
- [4] CHEN S, BILLINGS S.A. Representation of non-linear system: the NARMAX model. *International journal control* 49 pag 1012-1032
- [5] SPECHT D.F. A general regression neural network. *IEEE transactions on Neural networks*, Vol.2 Issue 6 1991. ISSN: 1045-9227
- [6] NELLES O. Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and

- fuzzy models. Published Springer- Berlin- 2001 ISBN 3-540-67369-5
- [7] INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS. UIC CODE 518. Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour – safety – track fatigue – ride quality. 2nd edition, April 2003. 72 p.
- [8] BABUSKA R., Fuzzy modeling for control. Kluwer Academic publishers. 1998 ISBN: 978-0-7923-8154-9
- [9] KUMAR M, STOLL R, STOLL N., A min-max approach to fuzzy clustering, estimation, and identification. IEEE transactions on fuzzy system, Vol 14, No 2, 2006 pp 248-262 ISSN: 1063-6706
- [10] HWANG C, CHUNG-HOON RHEE F, Uncertain fuzzy clustering: Intervak type-2 fuzzy approach to C-means. IEEE transactions on fuzzy system, Vol 15, No 1, 2007 pp 107-120. ISSN: 1063-6706
- [11] HONDA K, ICHIHASHI H, Regularized linear fuzzy clustering and probabilistic PCA mixture models, IEEE transactions on fuzzy system, Vol 13, No 4, 2005 pp 508-516 ISSN: 1063-6706
- [12] TAKAGI T, SUGENO, M. Fuzzy Identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Transactions on systems, man, and Cybernetics. Vol. SMC-15. 1985. pp.116-132.
- [13] BABUSKA R, Fuzzy modeling and identification toolbox
- [14] WALPOLE, Ronald E. y MYERS, Raymond H. Probabilidad y estadística. Ed. 4. México: Mc Graw Hill, 1992, 797p. ISBN 968-422-992-5.
- [15] KREYSZIG, Edwin. Introducción a la estadística matemática: principios y métodos. México : Editorial Limusa S.A. 1978, 505p.
- [16] ZOLTOWSKI B, CASTAÑEDA L, BETANCOURT G, Monitoreo Multidimensional de la Interfase Vía-Vehículo de un Sistema Ferroviario Congreso Internacional de Mantenimiento – ACIEM – Marzo 2007. Bogotá Colombia
- [17] M. ISHIDA, M. AKAMA, K. KASHIWAYA, A. KAPOOR « The current status of theory and practice on rail integrity in Japanese railways—rolling contact fatigue and corrugations ». Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 26. No 10. 2003. pp.909-919.
- [18] ZOETEMAN, A. ESVELD, C. « State of the art in railway maintenance management: planning systems and their application in Europe ». Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on. Vol. 5. 2004. pp.4165-4170.
- [19] OTTOMANELLI M, DELL'ORCO M, SASSANELLI D. « A Decision Support System Based on Neuro-Fuzzy System for Railroad Maintenance Planning ». <http://dblp.uni-trier.de>
- [20] DEBIOLLES A, OUKHELLOU, L. AKNIN, P. « Combined use of partial least squares regression and neural network for diagnosis tasks ». Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on. Vol. 4. 2004. pp.573-576.
- [21] DEBIOLLES A, OUKHELLOU, L. AKNIN, P. « Linear and nonlinear regressions using PLS feature selection and NN on defect diagnosis application». Int. Conf. On Machine Intelligence ICMI 2005.
- [22] CASTAÑEDA L, ZOLTOWSKI B « Diagnostic System for the metro train ». International Conference on Maintenance Engineering (ICME), Cheng Du, China. October 15-18, 2006.
- [23] CASTAÑEDA L, ZÓLTOWSKI B Metoda środowiskowych badań pojazdu szybowego. Inżyniera i Aparatura Chemiczna. SIMPress, Gliwice, Poland. 3 specjalne maj 2006 Pag. 100-104. ISSN 0368 - 0827
- [24] CASTAÑEDA L, ZÓLTOWSKI B Portable Diagnostic System for the Metro Train Diagnostyka, vol. 37, Nr 1 (37) 2006, Olsztyn – Poland. Pag. 39-45. ISSN 641-6414

18.5 ANEXO 5- REGLAS DEL SISTEMA EXPERTO

Regla 1

IF:

Evaluar indice de seguridad en marcha? si

AND: [Angulo] >=70

THEN:

Condicion rueda "el angulo de la pestaña esta dentro del rango permisible. La rueda no necesita reperfilado"

>>> [Angulo] =(ATAN([Sh]/[Qr]))*180/3.1416

>>> [YQteo] = ((TAN([Angulo]*3.1416/180))-[Co_Fric])/((1+[Co_Fric]*TAN([Angulo]*3.1416/180)))

>>> [YQreal] = [Yreal]/[Qreal]

Regla 2

IF:

Evaluar indice de seguridad en marcha? si

AND: [Angulo] <70

THEN:

Condicion rueda "el angulo de la rueda esta fuera del rango permisible. Reperfile la rueda para darle un angulo a la pestaña de 70°"

>>> [Angulo] =(ATAN([Sh]/[Qr]))*180/3.1416

>>> [YQteo] = ((TAN([Angulo]*3.1416/180))-[Co_Fric])/((1+[Co_Fric]*TAN([Angulo]*3.1416/180)))

>>> [YQreal] = [Yreal]/[Qreal]

Regla 3

IF:

Evaluar indice de seguridad en marcha? si

AND: [Co_Fric] <=0.35

THEN:

Condicion del coeficiente de friccion: "el coeficiente de friccion
esta en el rango admisible"

>>> $[YQ_{teo}] = \frac{((\text{TAN}([\text{Angulo}] * 3.1416 / 180)) - [\text{Co_Fric}])}{((1 + [\text{Co_Fric}] * \text{TAN}([\text{Angulo}] * 3.1416 / 180)))}$

>>> $[YQ_{real}] = [Y_{real}] / [Q_{real}]$

>>> $[\text{Angulo}] = (\text{ATAN}([\text{Sh}] / [\text{Qr}])) * 180 / 3.1416$

Regla 4

IF:

Evaluar indice de seguridad en marcha? si

AND: $[\text{Co_Fric}] > 0.35$

THEN:

Condicion del coeficiente de friccion: "el coeficiente de friccion
es alto. Si la rueda acaba de ser reperfilada, suavice la
superficie hasta obtener un coeficiente de friccion de 0.35"

>>> $[YQ_{teo}] = \frac{((\text{TAN}([\text{Angulo}] * 3.1416 / 180)) - [\text{Co_Fric}])}{((1 + [\text{Co_Fric}] * \text{TAN}([\text{Angulo}] * 3.1416 / 180)))}$

>>> $[YQ_{real}] = [Y_{real}] / [Q_{real}]$

>>> $[\text{Angulo}] = (\text{ATAN}([\text{Sh}] / [\text{Qr}])) * 180 / 3.1416$

Regla 5

IF:

Evaluar indice de seguridad en marcha? si

AND: $[YQ_{teo}] \geq 1.2$

THEN:

Condicion del criterio de Nadal: "la relacion Y/Q teorica esta
dentro del rango admisible"

>>> $[YQ_{teo}] = \frac{((\text{TAN}([\text{Angulo}] * 3.1416 / 180)) - [\text{Co_Fric}])}{((1 + [\text{Co_Fric}] * \text{TAN}([\text{Angulo}] * 3.1416 / 180)))}$

>>> $[YQ_{real}] = [Y_{real}] / [Q_{real}]$

>>> $[\text{Angulo}] = (\text{ATAN}([\text{Sh}] / [\text{Qr}])) * 180 / 3.1416$

Regla 6

IF:

Evaluar indice de seguridad en marcha? si

AND: [YQteo] <1.2

THEN:

Condicion del criterio de Nadal: "La relacion Y/Q teorica es muy baja. Reperfile la rueda hasta obtener un angulo de pestaña mayor o igual a 70° o suavice la superficie de la rueda hasta obtener un coeficiente de friccion menor o igual a 0.35"

>>> [YQteo] = ((TAN([Angulo]*3.1416/180))-[Co_Fric])/((1+[Co_Fric]*TAN([Angulo]*3.1416/180)))

>>> [YQreal] = [Yreal]/[Qreal]

>>> [Angulo] =(ATAN([Sh]/[Qr]))*180/3.1416

Regla 7

IF:

Evaluar indice de seguridad en marcha? si

AND: [YQreal] <[YQteo]

THEN:

Condicion Y/Qreal "La relacion Y/Q real es menor que la teorica.
No hay riesgo de descarrilamiento"

[Mg_segur] = (([YQteo]-[YQreal])/[YQteo])*100

>>> [YQreal] = [Yreal]/[Qreal]

>>> [YQteo] = ((TAN([Angulo]*3.1416/180))-[Co_Fric])/((1+[Co_Fric]*TAN([Angulo]*3.1416/180)))

>>> [Angulo] =(ATAN([Sh]/[Qr]))*180/3.1416

Regla 8

IF:

Evaluar indice de seguridad en marcha? si

AND: [YQreal] >=[YQteo]

THEN:

Condicion Y/Qreal "La relacion Y/Q real es mayor que la teorica.

Existe riesgo de descarrilamiento"

Recomendaciones: Para incrementar la relacion Y/Q teorica debe: Reperfilar la rueda hasta obtener un angulo de pestaña mayor o igual a 70°. Suavizar la superficie de contacto para disminuir el coeficiente de friccion a un valor menor o igual a 0.35. Para disminuir la relacion Y/Q real debe: Aumentar la carga vertical o disminuir la carga lateral.

$$>>> [YQreal] = [Yreal]/[Qreal]$$

$$>>> [YQteo] = ((TAN([Angulo]*3.1416/180))-[Co_Fric])/((1+[Co_Fric]*TAN([Angulo]*3.1416/180)))$$

$$>>> [Angulo] = (ATAN([Sh]/[Qr]))*180/3.1416$$

Regla 9

IF:

A cual coche pertenece la rueda? Coche Motor A

AND: [Qreal] >[Chartet]

THEN:

Condicion Chartet "La fuerza vertical Q es mayor que el criterio de Chartet. No existe riesgo de descarrilamiento"

$$[Mg_segur2] = [Qreal]-[Chartet]$$

$$>>> [Chartet] = (0.6*[Qteo])$$

$$>>> [Qteo] = 52.817$$

Regla 10

IF:

A cual coche pertenece la rueda? Coche Motor A

AND: [Qreal] <[Chartet]

THEN:

Condicion Chartet "La fuerza vertical Q es menor que el criterio de Chartet. Existe alto riesgo de descarrilamiento"

$$>>> [Chartet] = (0.6*[Qteo])$$

$$>>> [Qteo] = 52.817$$

Regla 11

IF:

A cual coche pertenece la rueda? Coche Motor B

AND: $[Q_{real}] > [Chartet]$

THEN:

Condicion Chartet "La fuerza vertical Q es mayor que el criterio de Chartet. No existe riesgo de descarrilamiento"

$[Mg_segur2] = [Q_{real}] - [Chartet]$

>>> $[Chartet] = (0.6 * [Q_{teo}])$

>>> $[Q_{teo}] = 51.750$

Regla 12

IF:

A cual coche pertenece la rueda? Coche Motor B

AND: $[Q_{real}] < [Chartet]$

THEN:

Condicion Chartet "La fuerza vertical Q es menor que el criterio de Chartet. Existe alto riesgo de descarrilamiento"

>>> $[Chartet] = (0.6 * [Q_{teo}])$

>>> $[Q_{teo}] = 51.750$

Regla 13

IF:

A cual coche pertenece la rueda? Coche Remolque

AND: $[Q_{real}] > [Chartet]$

THEN:

Condicion Chartet "La fuerza vertical Q es mayor que el criterio de Chartet. No existe riesgo de descarrilamiento"

$[Mg_segur2] = [Q_{real}] - [Chartet]$

>>> $[Chartet] = (0.6 * [Q_{teo}])$

>>> $[Q_{teo}] = 34.962$

Regla 14

IF:

A cual coche pertenece la rueda? Coche Remolque

AND: $[Q_{real}] < [Chartet]$

THEN:

Condicion Chartet "La fuerza vertical Q es menor que el criterio de Chartet. Existe alto riesgo de descarrilamiento"

>>> $[Chartet] = (0.6 * [Q_{teo}])$

>>> $[Q_{teo}] = 34.962$

18.6 ANEXO 6 – FUERZAS LATERALES Y VERTICALES OBTENIDAS EXPERIMENTALMENTE

Velocidad [km/h]	Fuerza [kN]	Coche Motor (A)				Coche Remolque (R)				Coche Motor (B)			
		Eje1	Eje2	Eje3	Eje4	Eje5	Eje6	Eje7	Eje8	Eje9	Eje10	Eje11	Eje12
20	FQL	65,75	63,76	56,951	54,423	40,805	43,559	44,575	41,388	60,206	60,391	59,54	60,55
	FYL	18,39	14,64	15,889	12,763	14,3	13,162	16,107	13,716	15,674	13,367	14,54	14,67
	FQR	37,57	37,31	54,111	39,244	30,226	27,593	26,917	29,638	38,987	39,043	42,08	41,56
	FYR	2,92	-3,36	-7,793	-2,224	3,7247	-1,593	0,2877	4,0874	-3,0611	-3,4268	-3,63	-2,65
40	FQL	63,33	61,98	56,135	53,948	41,971	42,004	41,171	42,686	56,658	56,253	58,15	62,57
	FYL	14,89	13,84	11,715	13,346	12,257	12,445	12,661	8,7102	12,91	13,471	13,87	16,54
	FQR	43,09	51,64	50,414	52,131	38,102	33,145	35,313	34,411	51,921	52,226	52,26	49,77
	FYR	6,939	-7,85	-5,098	-3,892	10,071	-4,845	-1,0118	0,9641	-6,5693	-6,6488	-5,79	-5,07
60	FQL	56,28	61,69	58,252	54,349	48,483	37,887	39,321	42,043	40,327	56,737	54,82	61,87
	FYL	9,192	10,84	11,625	10,201	11,537	10,876	13,828	11,871	19,311	9,603	11,55	16,46
	FQR	50,35	51,43	49,031	52,703	46,818	38,837	36,615	40,252	39,813	58,513	55,02	59,64
	FYR	4,167	-3,2	-2,566	-5,855	-0,753	-2,934	-1,2665	7,0258	7,034	-5,6425	-1,03	-7,07
80	FQL	56,19	56,74	61,453	59,66	53,791	39,324	40,169	41,892	42,503	53,869	56,85	62,95
	FYL	8,376	9,821	13,781	13,521	14,275	6,6249	15,724	10,315	17,786	9,2266	11,76	13,22
	FQR	45,61	51,8	47,634	55,237	45,191	34,328	34,467	35,811	44,707	53,013	58,50	66,30
	FYR	4,764	-8,01	-0,291	-2,991	-1,351	-4,387	0,0786	6,3244	8,7327	-4,2619	-6,48	-9,40

Grupo de Estudios en Mantenimiento Industrial – GEMI

18.7 ANEXO 7 – CARACTERISTICAS TIPICAS DE UNA UNIDAD

CARACTERISTICAS TIPICAS DE LA UNIDAD												
Coche	Pos Eje	Serie Eje	Rueda	SD	SH	QR	Dia	Red. pto. 70	Diferencia de diametros			
									Ruedas bogie	Bogies coche	Coches unidad	
C M A	1	377	R	32,0	29,0	10,0	824,4	0,05	0,3	1,7	14,8	
			L	31,0	29,0	9,9	824,7	0,05				
	2	386	R	31,5	29,0	9,0	824,7	0,04				
			L	31,9	29,0	10,1	824,7	0,06				
	3	210	R	31,1	28,8	10,0	826,1	0,06				0,3
			L	31,0	29,0	8,3	826,1	0,05				
4	320	R	31,6	29,0	9,0	826,1	0,04					
		L	31,7	29,1	10,0	825,8	0,04					
C R	5	77	R	31,0	28,0	8,2	812,8	0,05	0,3	1,2	14,8	
			L	31,0	28,5	9,3	813,1	0,06				
	6	34	R	31,6	28,0	9,2	813,1	0,05				
			L	31,8	28,1	8,5	813,1	0,05				
	7	10	R	31,7	28,2	8,3	814,0	0,06				0,3
			L	31,0	28,8	9,1	814,0	0,04				
8	9	R	31,5	28,5	9,0	814,0	0,05					
		L	31,0	28,2	8,7	813,7	0,05					
C M B	9	208	R	31,2	28,2	8,7	827,6	0,06	0,2	10,1		
			L	31,5	28,4	9,3	827,6	0,05				
	10	207	R	31,8	28,8	9,7	827,6	0,05				
			L	31,5	28,6	9,5	827,4	0,06				
	11	322	R	32,1	28,8	9,8	817,5	0,05				0,3
			L	31,6	28,7	9,6	817,7	0,04				
12	321	R	31,8	28,6	9,8	817,8	0,05					
		L	31,8	28,4	9,7	817,7	0,06					

MARIN, 2006, 120.