



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Sistemas expertos orientados al mantenimiento industrial

Trabajo de Investigación para optar el Grado de
Bachiller en Ingeniería Mecánico - Eléctrica

Sheyla Anette Huertas Gonzales
Jorge Teo Manuel Rivera Valdiviezo
Miguel Abraham Trauco Trelles

Asesor:
Mgtr. Ing. Jorge Arturo Yaksetig Castillo

Piura, diciembre de 2020



Resumen

La presente investigación tiene como objetivo resaltar la importancia de la aplicación de los Sistemas Expertos en el Mantenimiento Industrial. Por ello, para entrar en contexto, se brinda conocimientos básicos del Sistema Experto y Mantenimiento Industrial.

Asimismo, se cuenta con un capítulo acerca de las implicancias que tiene orientar un Sistema Experto al área del Mantenimiento Industrial, qué conceptos hay que reforzar o adquirir para el desarrollo de este, qué es lo que se necesita de manera específica para el desarrollo de un sistema orientado al mantenimiento, y con la ayuda de las distintas metodologías que pueden presentarse hoy en día para el desarrollo de un sistema como el mencionado, brindar una metodología concisa y detallada la cual uno puede seguir para el desarrollo de un sistema orientado al Mantenimiento Industrial.

Finalmente, para reforzar la metodología brindada previamente, mediante casos reales de sistemas expertos ya desarrollados aplicados al Mantenimiento Industrial, se busca brindar una base sólida para cualquier persona que esté interesada en desarrollar un sistema experto y aplicarlo a algún proyecto de mantenimiento que tenga en mente o esté en vías de desarrollo.



Tabla de contenido

Introducción	13
Justificación	15
Objetivos	17
Capítulo 1	19
Introducción a los sistemas expertos	19
1.1. Definición de un sistema experto	19
1.2. Desarrollo histórico	19
1.3. Disciplinas que comprende el sistema experto	20
1.3.1. Medicina	21
1.3.2. Militar	21
1.3.3. Contabilidad	21
1.3.4. Electrónica, informática y telecomunicaciones	21
1.3.5. Pesca	22
1.3.6. Aeronáutica	22
1.3.7. Mantenimiento industrial	22
1.4. Arquitectura de un sistema experto	23
1.4.1. Base de conocimiento	23
1.4.2. Mecanismo de inferencia	23
1.4.3. Memoria de trabajo	24
1.4.4. Interfaces	24
1.4.5. Subsistema de Explicación.	24
1.4.6. Subsistema de Aprendizaje	25
1.5. Lenguajes de programación para sistemas expertos	26

1.5.1. LISP	26
1.5.2. CLIPS	26
1.5.3. Prolog	27
1.5.4. C y C++	28
Capítulo 2	31
Mantenimiento industrial	31
2.1. Evolución histórica	31
2.2. Estrategias de mantenimiento (correctivo, preventivo, proactivo)	32
2.2.1. Mantenimiento correctivo	32
2.2.2. Mantenimiento preventivo	32
2.2.3. Mantenimiento proactivo	33
2.3. Metodologías de optimización (RCM, PMO, TPM)	34
2.3.1. RCM: Mantenimiento centrado en la confiabilidad	34
2.3.2. PMO: Optimización del mantenimiento planeado	35
2.3.3. TPM: Mantenimiento productivo total	36
Capítulo 3	39
Sistemas expertos orientado al mantenimiento industrial	39
3.1. Protagonistas	39
3.1.1. Desarrollador	39
3.1.2. Experto	40
3.1.3. Usuario	40
3.1.4. Administración	40
3.2. Metodología	41
3.2.1. Determinar el problema específico	41
3.2.2. Determinar estructura del sistema	42
3.2.3. Determinar el grupo de expertos	42
3.2.4. Documentar los pasos realizados por el experto para resolver el problema	44
3.2.5. Adquisición de conocimientos	44
3.2.6. Construcción del sistema experto	46

3.2.7. Verificación del sistema experto.....	49
3.2.8. Mantenimiento del sistema experto	50
Capítulo 4	51
Casos de sistemas expertos aplicados al mantenimiento industrial	51
4.1. Sistema experto para el mantenimiento predictivo en una central hidroeléctrica ..	51
4.1.1. Esquema del prototipo	51
4.1.2. Funcionamiento del prototipo	52
4.2. Sistema experto de ayuda al mantenimiento de osciloscopios analógicos.	53
4.3. Un sistema experto de diagnóstico de fallas basado en parámetros de aeronaves .	56
4.3.1. Proceso de diagnóstico de fallas	56
4.3.2. Sistema de software de diseño	57
4.4. Un sistema experto para el mantenimiento predictivo de excavadoras en minería a tajo abierto.....	58
4.4.1. Componentes del sistema experto para FDPM	59
4.4.2. Resultados.....	61
Conclusiones.....	63
Referencias bibliográficas	65



Lista de tablas

Tabla 1. Parámetros de producción y sus pesos.	59
Tabla 2. Estrategias de Mantenimiento aplicadas según el Índice de Criticidad.	60





Lista de figuras

Figura 1. Estructura básica de un Sistema Experto	25
Figura 2. Diagrama de un Sistema Tradicional	25
Figura 3. Diagrama de un Sistema Experto	25
Figura 4. Estructura de los objetos básicos en LISP.	26
Figura 5. Ejemplo de un sistema experto escrito en lenguaje C que indica si un sensor está bueno o malo.	27
Figura 6. Árbol de deducción del problema de animales.	28
Figura 7. Código para obtener el área y perímetro de un círculo en C.....	29
Figura 8. Código para obtener el área y perímetro de un círculo en C++.....	29
Figura 9. Modelo Organizacional de Henry Ford.	31
Figura 10. Modelo Organizacional de Henry Ford reformado.	32
Figura 11. Criterios para realizar el mantenimiento proactivo.....	34
Figura 12. Ciclo del mantenimiento correctivo.....	35
Figura 13. Pilares del TPM	37
Figura 14. Sistemas expertos en el mantenimiento de sistemas técnicos.	41
Figura 15. Diseño de la estructura de un Sistema Experto.	43
Figura 16. Pasos para determinar el grupo de expertos en mantenimiento.....	43
Figura 17. a) Proceso lógico para cargar una regla a la base de conocimientos. b) Proceso lógico para cargar un hecho a la base de conocimientos.....	45
Figura 18. Etapas de la adquisición del conocimiento.	46
Figura 19. Estructura general de la construcción de un Sistema Experto.	47
Figura 20. Metodología desarrollada para la etapa de recolección del conocimiento.	48
Figura 21. Metodología desarrollada para la elaboración del prototipo.....	48

Figura 22. Verificación de la consistencia y la completitud en bases de conocimientos.	50
Figura 23. Esquema general del sistema experto planteado.....	51
Figura 24. Esquema de funcionamiento del sistema experto planteado.	52
Figura 25. Diagrama básico de bloques de un osciloscopio de rayos catódicos.	53
Figura 26. Nivel de análisis durante la reparación de un osciloscopio.	54
Figura 27. Módulos del lenguaje Wucshell.	55
Figura 28. Sistema Experto para FDPM de excavadoras de minas.	59
Figura 29. Componentes del Sistema Experto para FDPM.	61



Introducción

Un Sistema Experto es un concepto que viene desarrollándose desde hace algunas décadas. Nace en la necesidad de construir un sistema que emule el razonamiento humano para solucionar problemas en determinadas áreas a partir de conocimientos previos dados por expertos en el campo aplicado.

Actualmente se han diseñado y ejecutado numerosos Sistemas Expertos en distintas áreas como, medicina, química, agricultura e ingeniería. Especialmente para esta última, este trabajo de investigación está enfocado en los Sistemas Expertos orientados al Mantenimiento Industrial, campo en el que actúan como una herramienta especialmente preventiva para detectar fallas a tiempo.

El trabajo de investigación tiene como guía base una tesis de la Universidad EAFIT, Medellín titulada “Diseño de un Sistema Experto en Mantenimiento e Implementación en un Sistema de Ingeniería”. En la cual se desarrolla un Sistema Experto aplicado en el índice de seguridad en marcha de vehículos ferroviarios. De esta tesis se rescata los conceptos fundamentales y la metodología para el diseño y desarrollo de un Sistema Experto orientado al Mantenimiento Industrial.

Respecto a los casos de aplicación se han considerado cuatro artículos en los cuales se diseña un Sistema Experto para dar mantenimiento a determinadas áreas de la industria. El primero se titula “Sistema Experto para el Mantenimiento Predictivo de una Central Hidroeléctrica”, en él se elabora un Sistema Experto encargado de supervisar el sistema para el diagnóstico de fallos e incidentes, y analizar las variables del sistema para predecir averías y planificar intervenciones.

El segundo artículo es “Sistema Experto de ayuda al mantenimiento de osciloscopios analógicos” donde se aplica un Sistema Experto para la búsqueda de fallas, además de ser una herramienta para capacitar a profesionales y estudiantes.

El tercer artículo, “*A Fault Diagnosis Expert System Based on Aircraft Parameters*”, presenta un Sistema Experto que diagnostica una falla en base al modo de falla. Para ello toman los datos de vuelo de cierto tipo de aeronave y de estos datos extraen información de los síntomas de falla y el modo de falla del sistema.

En el cuarto artículo, *“An Expert System for Predictive Maintenance of Mining Excavators and its Various Forms in Open Cast Mining”*, se diseña y desarrolla un Sistema Experto para identificar, detectar y localizar las fallas gracias a una base de conocimientos, modelo matemático y de redes neuronales.



Justificación

Con la industria 4.0, llamada así debido a ser considerada la cuarta revolución industrial, nace el concepto de conectividad, para un posterior acceso remoto a través de Internet, siendo la palabra clave interconectividad. Esto ha adquirido auge velozmente gracias a distintas disciplinas como la IoT (*Internet of Things*), la cual permite innovar tareas en los equipos tal como tener control sobre aparatos inteligentes de manera remota, y recepcionar alertas como actualizaciones de un software haciendo posible que dicho equipo pueda comunicar datos en tiempo real en ausencia del ser humano siempre y cuando se encuentre conectado a una red.

A partir de la invención del primer ordenador, han aparecido distintas preguntas importantes tales como, ¿Pueden pensar realmente?, ¿Llegarán a ser verdaderamente inteligentes?, ¿Cuál es la naturaleza de la inteligencia?

La capacidad de aprendizaje es un factor que permite determinar el nivel de inteligencia, este se evalúa de distintas maneras dependiendo del programa de inteligencia artificial, el cual está condicionado por una retroalimentación o *feedback* donde se recibe información sobre sus logros o fracasos. Otros factores para determinar la capacidad de aprendizaje son: la capacidad de razonamiento, el proceso de decisiones del ordenador basado en su mayoría en sentencias condicionales y la comprensión del lenguaje natural.

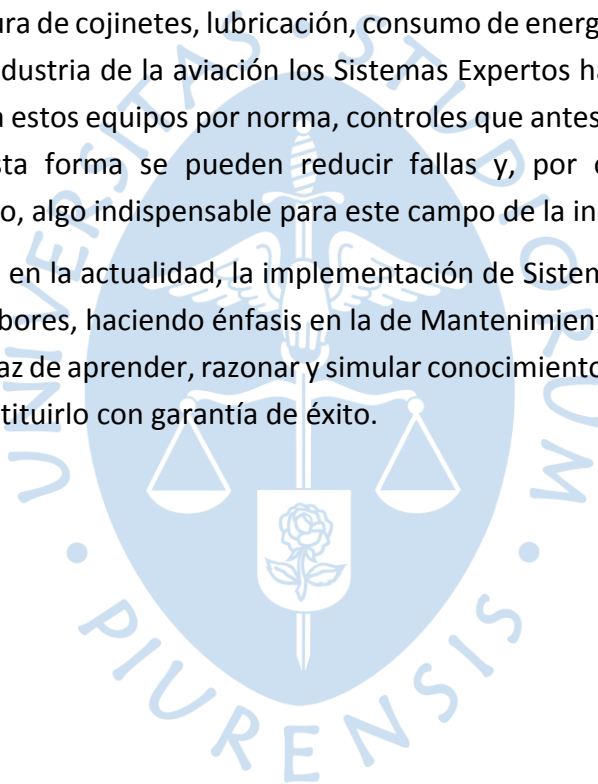
Los Sistemas Expertos ofrecen una gran serie de ventajas tal como la capacidad de manipular las reglas que se le han dado y sacar conclusiones a partir de ellas, es decir, es capaz de razonar, pudiendo descubrir nuevas posibilidades y almacenarlas en su base de datos. Cabe recalcar que los mecanismos de manipulación y deducción son independientes de la base de datos, lo cual lo hace un sistema autónomo. La potencia de un Sistema Experto está basada en una gran cantidad de conocimientos y va más allá que un formalismo deductivo muy eficaz.

Personas con poca experiencia tienen la posibilidad de resolver un problema que requiere un “conocimiento especializado” con la ayuda de los Sistemas Expertos. Además, estos son capaces de resolver problemas de forma más rápida que los expertos humanos, siendo esto una gran ventaja en situaciones donde el tiempo juega un papel crítico, por ejemplo, el control de refrigeración de una central nuclear.

Dentro de las aplicaciones de los Sistemas Expertos encontramos la orientación a las actividades del Mantenimiento Industrial. Dichos Sistemas Expertos pueden ser utilizados en el mantenimiento preventivo y predictivo en sistemas de ingeniería tales como sistemas de monitorización, donde se diagnostican fallas en base a comparación continua de valores de entrada y valores que actúan como criterios de estándares o *set point*. El programa es capaz de determinar el estado de funcionamiento de sistemas complejos, anticipándose a posibles incidentes que pudieran acontecer, haciendo frente a fallas que causan una disminución en la calidad del proceso, así como la posibilidad de causar grandes pérdidas económicas.

El uso de Sistemas Expertos en mantenimiento se está incrementando y es que con estos se logra la predicción de fallas que pueden ser críticas para la planta. En sistemas rotativos los Sistemas Expertos se están usando para monitorear variables tales como vibraciones, temperatura de cojinetes, lubricación, consumo de energía, gases de combustión, etc. Asimismo, en la industria de la aviación los Sistemas Expertos hacen eficiente el control manual que se realiza a estos equipos por norma, controles que antes resultaban extenuantes y complicados. De esta forma se pueden reducir fallas y, por otro lado, aumentar la confiabilidad del equipo, algo indispensable para este campo de la industria.

Es por ello que, en la actualidad, la implementación de Sistemas Expertos optimizaría una amplia gama de labores, haciendo énfasis en la de Mantenimiento Industrial. Un sistema informático que es capaz de aprender, razonar y simular conocimientos basados en un experto humano, pudiendo sustituirlo con garantía de éxito.

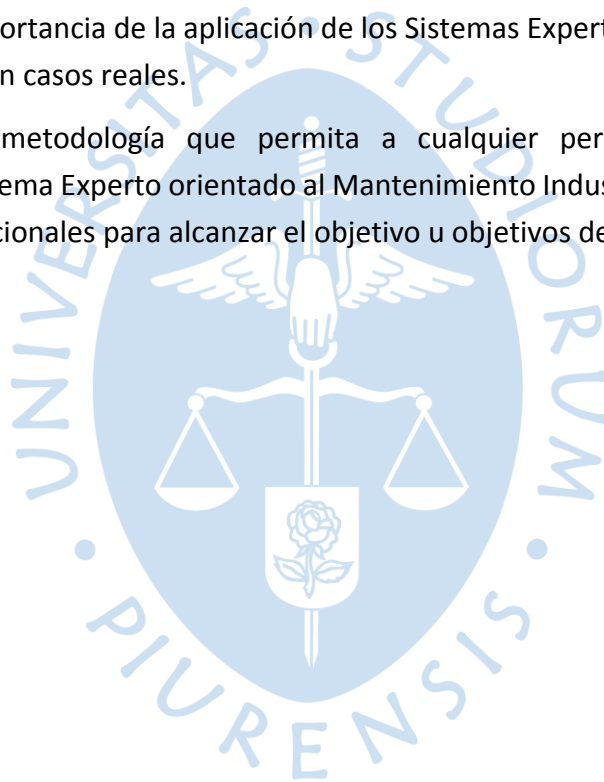


Objetivos

Dar a conocer conceptos importantes acerca de los Sistemas Expertos y el Mantenimiento Industrial para que, alguna persona interesada en el tema tenga un conocimiento básico sobre el diseño y desarrollo de un Sistema Experto.

Resaltar la importancia de la aplicación de los Sistemas Expertos en el Mantenimiento Industrial, apoyada con casos reales.

Detallar una metodología que permita a cualquier persona interesada en la elaboración de un Sistema Experto orientado al Mantenimiento Industrial, seguir un conjunto de procedimientos racionales para alcanzar el objetivo u objetivos de su investigación.





Capítulo 1

Introducción a los sistemas expertos

1.1. Definición de un sistema experto

Es un campo de la inteligencia artificial (IA) que se emplea para resolver problemas en una determinada área a través de reglas o conocimiento heurístico; es decir, conocimiento adquirido por la experiencia o dado por un experto en dicha área.

Un Sistema Experto es básicamente un programa computacional que emula el razonamiento humano, de tal forma que usa la información que le proporciona el experto para dar una conclusión sobre un tema en específico. Los usuarios pueden usar estos sistemas para consultas, capacitaciones y especialmente como una forma de apoyo en la toma de decisiones con respecto a determinados problemas (León, 2007).

Las personas adquieren un conocimiento global del mundo a lo largo de todos los años de existencia y es evidente que es imposible suministrar todo conocimiento acerca de un tema a un sistema, por ende, un Sistema Experto tiene que mostrar solidez en el dominio de su conocimiento, es decir, conseguir distintas soluciones acertadas en la mayoría de las veces, al menos como un experto humano, y ser capaz de explicar y justificar las soluciones o recomendaciones al usuario que está manipulando el sistema, convenciéndolo de este modo que el razonamiento del sistema es correcto. (Escobar Villegas, 2008)

1.2. Desarrollo histórico

Los Sistemas Expertos forman parte de la ciencia de computación y su desarrollo se produjo a medida que se fue desarrollando también la IA.

El programa *General Problem Solver* (GPS) fue el precursor de los Sistemas Expertos el cual se desarrolló en la década de los 60' por los investigadores Alan Newell Y Herbert Simon. El GPS definía una ruta de acciones para transformar el estado inicial de un problema a una meta deseada, es decir, resolvía un problema. Este problema era representado como una tabla de conexiones de estados (inicial, intervención y final). (Oxford University Press, 2020)

En 1965, la Universidad de Stanford desarrolló el primer Sistema Experto. El programa se llamó DENDRAL y su diseño se basó en redes probabilísticas, el cual se empleó para identificar estructuras moleculares de compuestos químicos. DENDRAL comparaba los datos

históricos con las hipótesis más relevantes para la solución de determinados problemas (León, 2007) , convirtiéndose así en el primer Sistema Experto en ser utilizado para propósitos reales, al margen de la investigación computacional. Su desarrollo duró alrededor de 10 años y se convirtió en uno de los modelos a seguir por muchos de los programadores de Sistemas Expertos de la época, al igual que uno de los precursores hoy en día.

En 1972, se desarrolló el segundo Sistema Experto llamado MYCIN. La función del sistema era detectar trastornos en la sangre y dependiendo del diagnóstico recetaba los medicamentos adecuados. En 1973, se crea TIERESIAS para corregir los errores de diagnóstico del MYCIN, ya que cuando se introducía nueva información en él, a veces era incompleta o había fallas en el árbol de desarrollo de teorías (León, 2007).

CADUCEOS, un Sistema Experto empleado para realizar diagnósticos en medicina interna que buscaba mejorar el MYCIN, fue completado por Harry Pople en 1980, casi una década después de empezar a desarrollarse. El programa podía diagnosticar 1000 enfermedades y para ello usaba un motor de inferencia similar al de MYCIN (Badaró, Ibanez, & Martín, 2013).

En 1980, *Digital Equipment Corporation* (DEC) desarrolló XCON, inicialmente llamado R1. Este sistema fue escrito en OPS5¹ y se empleaba como sistema de ayuda para los clientes a la hora de seleccionar los componentes del sistema de las computadoras VAX, ya que cada cable, conexión y bit de software se pedía por separado. Sin embargo, unos años después este se discontinuó debido a que el mantenimiento del software era muy costoso (León, 2007).

Entre 1980 y 1985, el desarrollo de los Sistemas Expertos tomó fuerza y generó de ese modo una mayor producción de estos. Algunos de los programas desarrollados fueron: DELTA, que se empleaba para reparar locomotoras de *diesel* y eléctricas, y Aldo en Disco, destinado a la reparación de calderas hidrostáticas. En este lapso nacieron muchas empresas dedicadas al desarrollo de Sistemas Expertos, como *Carnegie Group*, *Symbolics*, *Lisp Machines Inc*, *Thinking Machines Corporation*, *Cognitive Systems Inc.* y *Teknowledge In.* (León, 2007).

Gracias a la evolución de la informática, a partir de los 90' se inicia un proyecto japonés de quinta generación para desarrollar computadores inteligentes que utilizarían técnicas y tecnologías de Inteligencia Artificial usando el lenguaje Prolog.(Escobar Villegas, 2008).

1.3. Disciplinas que comprende el sistema experto

Los Sistemas Expertos brindan prestaciones en resolución de problemas, razonamiento y aprendizaje automático, es así como esto se hace típico en el estudio de sistemas inteligentes en dominios específicos de conocimientos tales como:

¹ Pertenece a la familia de lenguajes de programación OPS, desarrollada por Charles Forgy.

1.3.1. Medicina

En esta área, los programas se pueden clasificar en:

- Métodos de contestación prefijada: Formados por algoritmos lógicos donde el control y conocimiento están juntos y escritos en lenguajes procedimentales.
- Métodos estadísticos: análisis discriminantes y secuenciales. (Quintanar, 2007)

1.3.2. Militar

Las aplicaciones de los Sistemas Expertos en este campo se centran:

- Guía de vehículos y proyectiles de forma semiautomática.
- Planificación estratégica.
- Reconocimiento automático de blancos.
- Reconocimiento de planes enemigos.
- Interpretación de señales provenientes de sensores. (Quintanar, 2007)

1.3.3. Contabilidad

Las aplicaciones potenciales de los Sistemas Expertos en el área de la contabilidad se dan en los siguientes campos:

- Auditoría: Análisis de materialidad y riesgo, planificación de auditoria, análisis de cuentas concretas, emisión de informe, auditoria informática, etc.
- Contabilidad de costes y de gestión: Asignación de recursos escasos, control de análisis y desviaciones, diseño de sistemas de información y de gestión, etc.
- Contabilidad financiera: Regulación legal, recuperación y revisión analítica de registros contables, imputación contable, consolidación de estados contables, etc.
- Análisis de estados financieros: Salud financiera de la empresa, análisis patrimonial; financiero y económico de los estados contables, cálculo y análisis de tendencias, etc. (Leon, 2007).

1.3.4. Electrónica, informática y telecomunicaciones

Las principales aplicaciones de los Sistemas Expertos en este campo se citan a continuación:

- Diseño de circuitos de alto grado de integración.
- Sistemas inteligentes de autodiagnóstico.
- Configuración de equipos y sistemas.
- Optimización de programas. (Quintanar, 2007)

1.3.5. Pesca

Una de las finalidades por las que se usa un Sistema Experto en el campo de la pesca es la de identificar o reconocer las diferentes especies de peces dentro de la gran cantidad de fauna marina que existe en el Perú permitiendo así un adecuado manejo de información de la biodiversidad íctica marina peruana y evitar la tragedia de los recursos comunes.

El Sistema Experto para el sector pesca permitirá concentrar la base de conocimientos de la fauna íctica marina peruana haciendo posible encontrar especies iguales o similares con precisión científico. (Vilchez, 2004).

1.3.6. Aeronáutica

Los Sistemas Expertos en la aeronáutica han tenido un impacto muy significativo ayudando a los pilotos con simulaciones, control, vuelos, diagnósticos, entrenamientos, etc.

Las simulaciones, por ejemplo, permiten a los futuros pilotos realizar prácticas de vital importancia con arquitecturas electrónicas y sistemas que simulan naves reales otorgando a los practicantes conocimientos sobre mecanismos de vuelo, control y solución de problemas evitando graves accidentes. (Leon, 2007).

1.3.7. Mantenimiento industrial

Los Sistemas Expertos son usados tanto en el mantenimiento preventivo y predictivo lo cual consiste en la comparación continua de señales de entrada con valores que se consideran de referencia o estándar.

En el campo del mantenimiento predictivo, los Sistemas Expertos se utilizan en principio como herramientas de diagnóstico. La finalidad es que el programa sea capaz de determinar el estado de funcionamiento de sistemas complejos y de manera continua, anticipándose a posibles fallas. Así, usándose un modelo computacional de razonamiento de un experto humano, se pretende alcanzar dichos resultados que alcanzaría un experto.

Este tipo de mantenimiento (predictivo), pretende detectar fallos antes de que estos ocurran sin alterar el funcionamiento normal de la planta, de modo que controlan los valores de variables y parámetros para así poder indicar existencia de fallos antes de que estos sean críticos.

En sistemas rotativos es necesario monitorear variables tales como vibración, temperatura de cojinetes, presión de lubricación, consumo de energía, gases de combustión, etc. Es así como el monitoreo continuo de la vibración debe ser manejado en una base de datos que permita un contraste para realizar un análisis de tendencia y tener un seguimiento continuo del estado de la máquina que pueda, en algún caso, tener un estado de alarma y planificar actividad de mantenimiento en un estado incorrecto de funcionamiento. (Villegas, 2008)

Finalmente, una buena programación de mantenimiento hace que las empresas en general cuenten con las siguientes ventajas:

- Elaboración de productos de alta calidad.
- Satisfacción de clientes con la entrega de producto en el tiempo acordado.
- Disminución de costos sujetos a paradas de procesos por fallas imprevistas.
- Evitación de daños irreparables en las máquinas.
- Facilitar la elaboración de presupuesto acorde con las necesidades de la empresa.

(Olarte, Botero, & Benhur, 2010)

1.4. Arquitectura de un sistema experto

Además de la posibilidad de poder contar tanto con un subsistema de justificación, así como de aprendizaje, los componentes básicos que conforman la estructura de un Sistema Experto son las que se mencionan a continuación:

- Base de conocimiento.
- Mecanismo de inferencia.
- Memoria de trabajo (base de hechos).
- Interfaces. (Villegas, 2008)

1.4.1. Base de conocimiento

Contiene la información de normas que componen el conocimiento de un especialista en un área en específico, dichos conocimientos son necesarios para comprender, formular y resolver el problema. Cabe indicar que mientras más amplia sea la base de conocimiento, el Sistema Experto tendrá mayor capacidad en la resolución de problemas.

La base de conocimientos está compuesta por:

- Hechos: Contiene los datos sobre la situación concreta, aquí se encuentra la situación del problema siendo este llamado “relación” y seguidos por ceros o ranuras, cada parte con sus respectivos valores asociados.
- Reglas: Dirigen la utilización del conocimiento para resolver el problema en cuestión. (Villegas, 2008)

1.4.2. Mecanismo de inferencia

Es el encargado de consultar todas las reglas y normas que componen la base de conocimiento con el fin de solucionar el problema. Es quizás la parte del Sistema Experto más importante, realiza constantes inferencias con el fin de satisfacer hechos, dando prioridad a reglas cumplidas y ejecutando la de mayor prioridad. Existen dos categorías que son usadas en el mecanismo de inferencia o motor de inferencia.

- **Determinismo:** La conclusión que se llega a partir de los hechos es una verdad universal.
- **Probabilístico:** Son predicciones que no siempre son ciertas, por tanto, se elige la probabilidad de mayor valor. (Villegas, 2008)

1.4.3. Memoria de trabajo

Es conocida como base de hechos y es la encargada de mantener los conocimientos activos. A partir de la especificación dada por los datos de entrada, reservan parte de la base de conocimientos para la descripción del problema en cuestión, asimismo, es utilizada para registrar resultados intermedios, además de hipótesis y decisiones. Estas últimas pueden ser de tres tipos:

- **Plan:** Describe de manera general como puede ser manejado el problema.
- **Agenda:** En existencia de acciones de gran importancia que esperan ser ejecutadas.
- **Solución:** Hipótesis y posibles soluciones que el sistema aporta, así como las dependencias que relacionan una decisión con otra. (Villegas, 2008)

1.4.4. Interfaces

Es la parte de la estructura básica que hace posible la interacción entre distintos tipos de entidades con el Sistema Experto. Esta interfaz puede ser:

- **Interfaz con usuario:** Maneja la relación directa entre la persona encargada del equipo y el Sistema Experto. Este último le presenta preguntas con el fin de ayudar a la obtención de una conclusión a partir de los hechos, o inferencias hechas por el Sistema Experto, así como la explicación del proceso para la obtención de esta. Es también denominado Sistema de consulta.
- **Interfaz con el desarrollador:** Permite la actualización de la base de conocimientos o mejoras en este por parte del desarrollador.
- **Interfaz con otros sistemas:** Hace posible la relación con otros sistemas a través de base de datos, hardware o sensores para la obtención de datos. (Villegas, 2008).

1.4.5. Subsistema de Explicación.

Es el encargado de explicar al usuario el proceso realizado para la obtención de una conclusión en específico, así como también en caso no se llegue a alguna conclusión, dar a conocer el tipo de información adicional que se necesita para garantizar la confiabilidad de los resultados. (Villegas, 2008)

1.4.6. Subsistema de Aprendizaje.

Hace posible que el Sistema Experto mejore a partir de la experiencia, analizando razones de éxito y fracasos para así perfeccionar la base de conocimiento. Esto le permite al Sistema ser más eficaz y efectivo en el futuro, además de dar conclusiones y resultados con mayor confiabilidad. (Villegas, 2008)

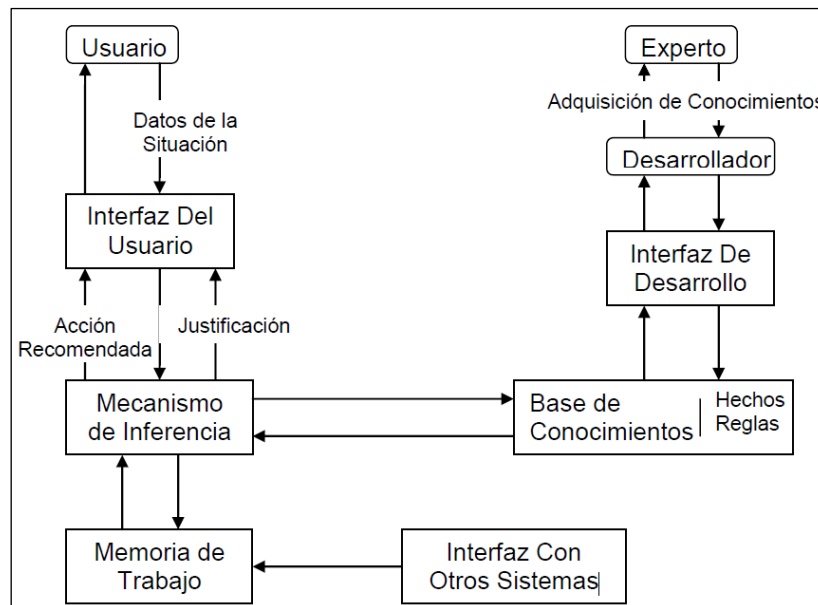


Figura 1. Estructura básica de un Sistema Experto

Fuente: (Villegas, 2008)

Una comparación entre un sistema tradicional y un Sistema Experto, se muestra a continuación:

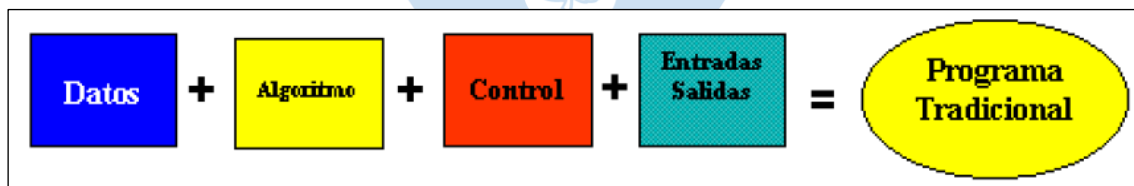


Figura 2. Diagrama de un Sistema Tradicional

Fuente: (Villegas, 2008)

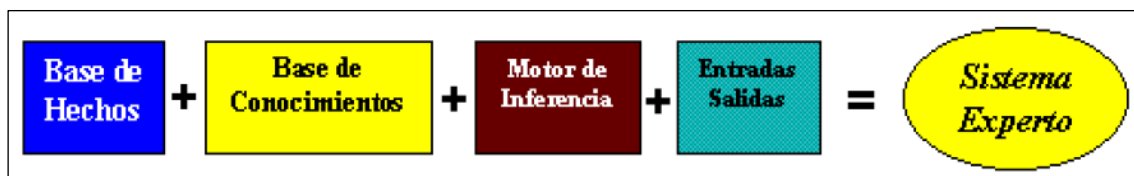


Figura 3. Diagrama de un Sistema Experto

Fuente: (Villegas, 2008)

1.5. Lenguajes de programación para sistemas expertos

1.5.1. LISP

LISP es uno de los primeros lenguajes de programación de alto nivel junto a FORTRAN Y COBOL. Fue desarrollado en 1958 por John McCarthy basándose en el cálculo lambda de Church. La sintaxis del lenguaje de LISP ha influido en la creación de otros lenguajes de programación tales como Scheme, Common Lisp, Emacs, Clojure. Este lenguaje de programación maneja 2 tipos de datos los cuales son los siguientes:

- Átomos: Combinaciones de letras del alfabeto inglés y números en base 10.
- Listas: Secuencia de átomos separados por un espacio y agrupados mediante paréntesis.

LISP fue usado para el desarrollo de la IA y Sistemas Expertos debido a que es un lenguaje muy fácil de usar comparado con los lenguajes actuales de programación, y no necesita conocimientos previos de programación.

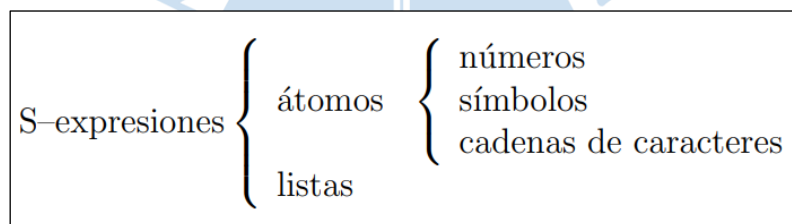


Figura 4. Estructura de los objetos básicos en LISP.

Fuente: (Jiménez, 1991)

1.5.2. CLIPS

CLIPS es el acrónimo de *C Language Integrated Production System* y es una herramienta usada en el desarrollo de Sistemas Expertos, el cual fue creado en 1984 por Gary Riley para ser usado en el Centro Espacial Lyndon B. Johnson de la NASA. Con CLIPS podemos realizar programación lógica, programación imperativa y programación orientada a objetos.

Mediante la programación lógica podemos asignar reglas que especifican las acciones que deben ser ejecutadas dada una situación particular. Con la programación orientada a objetos podemos modelar todo el Sistema Experto, podemos designar objetos, su estructura y como estos están relacionados entre sí. La programación imperativa permite estructurar y asignar el orden de las instrucciones, así como también declarar variables.

```

#define BAD 0
#define GOOD 1
#define DEVICE_OVERHEATED 0
#define DEVICE_NORMAL 1

int CheckSensors(sensorValues,numberOfSensors)
int sensorValues[];
int numberOfSensors;
{
    int firstSensor, secondSensor;

    for (firstSensor = 1;
        firstSensor <= numberOfSensors;
        firstSensor++)
    {
        for (secondSensor = 1;
            secondSensor <= numberOfSensors;
            secondSensor++)
        {
            if ((firstSensor != secondSensor) &&
                (sensorValues[firstSensor] == BAD) &&
                (sensorValues[secondSensor] == BAD))
            { return(DEVICE_OVERHEATED); }
        }
    }

    return(DEVICE_NORMAL);
}

```

Figura 5. Ejemplo de un sistema experto escrito en lenguaje C que indica si un sensor está bueno o malo.

Fuente: (Riley, 1991).

1.5.3. Prolog

Prolog es un lenguaje de programación interpretado desarrollado en 1972 por Alain Colmerauer y Philippe Roussel. Este programa fue aplicado en el campo de la inteligencia artificial debido a su capacidad de *backtracking*.

Cuando se ejecuta *Prolog* se determinan un conjunto de cláusulas que pueden ser ejecutadas de acuerdo con el objetivo escrito. Se selecciona la primera cláusula y se ejecuta hasta si el resultado final es verdadero o falso. Mediante *Backtracking*, si el resultado es falso, se regresa al estado antes de la ejecución de la elección y ejecución de la cláusula. Luego se escoge la siguiente cláusula y se repite el proceso. Al finalizar, si ninguna cláusula ha dado un valor verdadero, el resultado final se considera como falso.

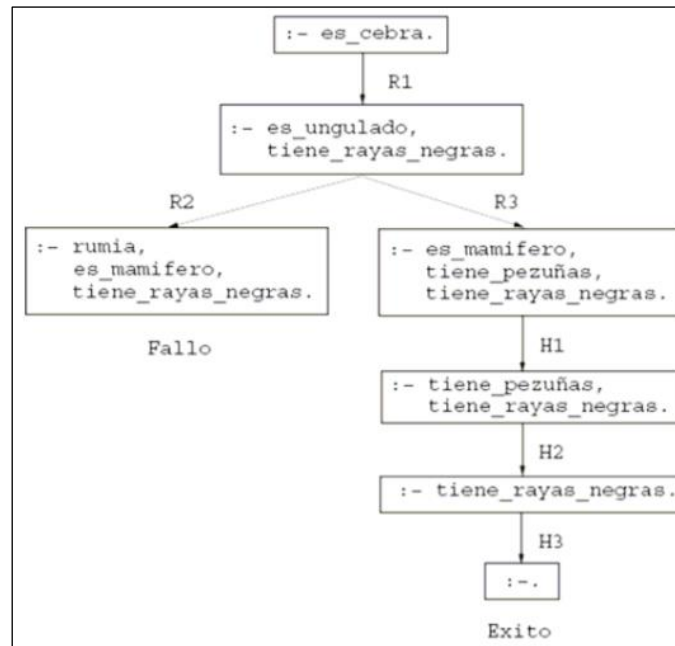


Figura 6. Árbol de deducción del problema de animales.

Fuente: (Pérez, J., & Morales, 2007).

1.5.4. C y C++

C es un lenguaje creado en 1972 por Dennis Ritchie como una mejora del lenguaje B, basado en BCPL. Este lenguaje se basa solo en la programación estructurada, es decir, opera mediante código secuencial ejecutando un conjunto de sentencias o instrucciones una por una.

El lenguaje C está orientado a la programación estructurada, por tanto, las funciones que utiliza este lenguaje son las siguientes:

- Programación estructurada.
- Variables y constantes.
- Condicionales.
- Sentencias repetitivas.
- Arrays.
- Funciones.

El lenguaje C++ fue creado en 1980 por Bjarne Stroustrup. Este lenguaje no es más que una extensión y mejora del lenguaje C, convirtiéndolo también en un lenguaje enfocado en la programación de objetos, el cual contiene las siguientes características:

- Todas las características del lenguaje C.
- Programación orientada a objetos.
- Encapsulamiento.
- Herencia.

- Polimorfismo.
- Sobrecargas.

Otra diferencia entre los lenguajes C y C++ es que la sintaxis de los lenguajes cambia. Por ejemplo, para pedir un dato en C se utiliza la función “*scanf*”, mientras que en C++ se utiliza la función “*cin*”.

A continuación, se mostrarán dos ejemplos que cumplen la misma función, pero escritos en dos diferentes lenguajes, C y C++.

```

1  #include<stdio.h>
2
3  int main()
4  {
5      int radio;
6      float area, perimetro;
7
8      // Imprimir mensaje en pantalla
9      printf("El radio del círculo es: ");
10
11     // Recibir entrada por teclado
12     scanf("%d", &radio);
13
14     // cálculos
15     area = 3.1416 * radio * radio;
16     perimetro = 3.1416 * radio * 2;
17
18     // Imprimir resultados en pantalla
19     printf("El área es %.2f y el perímetro %.2f", area, perimetro);
20     getch();
21
22     return 0;
23 }

```

Figura 7. Código para obtener el área y perímetro de un círculo en C.

Fuente: Elaboración propia.

```

1  #include<iostream>
2  using namespace std;
3
4  int main()
5  {
6      int radio;
7      float area, perimetro;
8
9      // Imprimir mensaje en pantalla
10     cout << " El radio del círculo es: ";
11
12     // Recibir entrada por teclado
13     cin >> radio;
14
15     // cálculos
16     area = 3.1416 * radio * radio;
17     perimetro = 3.1416 * radio * 2;
18
19     // Imprimir resultados en pantalla
20     cout << "El área es " << area << " y el perímetro " << perimetro;
21     cin.get();cin.get();
22
23     return 0;
24 }

```

Figura 8.Código para obtener el área y perímetro de un círculo en C++.

Fuente: Elaboración propia.



Capítulo 2

Mantenimiento industrial

2.1. Evolución histórica

En un inicio las empresas designaban a un mismo trabajador tareas de producción y reparación de equipos. Esto representaba un problema de tiempo y costo, ya que una misma persona dejaba de producir para reparar la máquina dañada. Para solucionarlo, los empresarios asignaron un grupo a cargo de la producción y otro a cargo de la reparación.

En 1930, nació el concepto de Mantenimiento Industrial con Henry Ford. Él desarrolló la “Producción en cadena”, un sistema que sirvió para organizar las responsabilidades dentro de la empresa (Olarte, Botero, & Benhur, 2010).

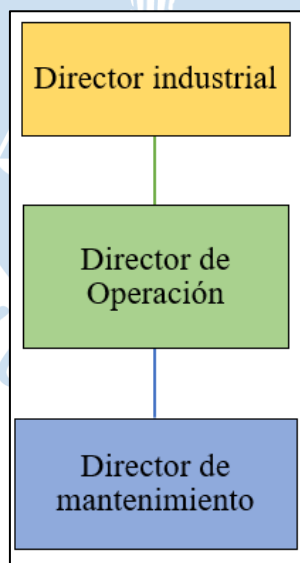


Figura 9. Modelo Organizacional de Henry Ford.

Fuente: (Olarte, Botero, & Benhur, 2010)

Con la Segunda Guerra Mundial, surgió el aumento de jornadas laborales para cubrir la creciente demanda de armamento en el mercado, en consecuencia, las máquinas estaban activas durante largas horas y los fallos eran más frecuentes, causando así parada en la producción y pérdidas económicas.

Ante los constantes fallos y altos costos de reparación las grandes empresas mejoraron el sistema de “Producción en cadena”. Se volvió necesario que el mantenimiento de las máquinas no estuviera un nivel inferior al de operación. Ahora la operación y mantenimiento se llevarían a cabo de manera paralela.

A partir del segundo sistema o sistema reformado el mantenimiento ha evolucionado hasta desarrollar tareas de reparación, de inspección y cambio de piezas defectuosas en el equipo (Olarte, Botero, & Benhur, 2010).

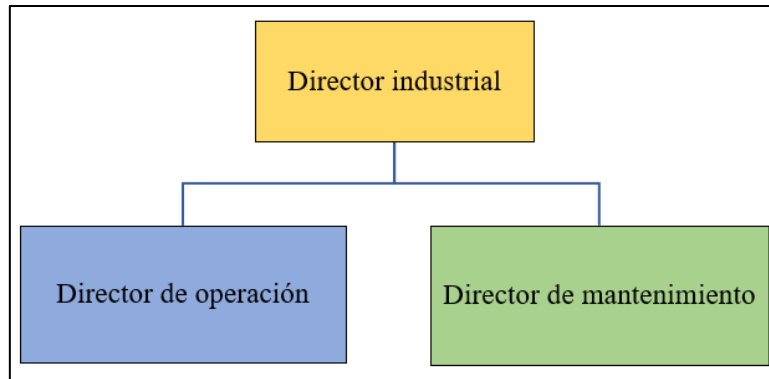


Figura 10. Modelo Organizacional de Henry Ford reformado.

Fuente: (Olarte, Botero, & Benhur, 2010)

2.2. Estrategias de mantenimiento (correctivo, preventivo, proactivo)

2.2.1. *Mantenimiento correctivo*

El mantenimiento correctivo está basado en la falla, es decir, se interviene cuando el activo ha fallado, por lo que no requiere ninguna planificación previa. Este mantenimiento es justificado cuando no supone una parada de planta o interrupción de producción, es decir cuando el activo es de naturaleza auxiliar (Gómez de León, 1998).

Aplicar el mantenimiento correctivo tiene algunas desventajas:

- Esperar a que falle el activo puede generar paradas de planta y consecuentemente pérdida de tiempo y dinero por parada de producción y por la reposición del activo.
- Un fallo en el activo puede comprometer la seguridad y salud del personal de trabajo.
- El tiempo previsto para la reparación del activo puede extenderse por falta de personal capacitado o falta de repuestos.

2.2.2. *Mantenimiento preventivo*

El mantenimiento preventivo pretende disminuir o evitar la reparación de un equipo mediante una serie de tareas e inspecciones realizadas periódicamente y la sustitución de los elementos deteriorados (Gómez de León, 1998). La frecuencia con que se realice este mantenimiento depende de la cantidad de producción, de las horas máquina empleadas, las condiciones bajo las cuales trabaja, entre otros factores.

El mantenimiento preventivo se realiza sin importar la condición previa del activo, ya que cualquiera que sea el estado en que se encuentre, se realiza el mantenimiento para mejorar la condición del activo o prevenir problemas.

Para implementar un sistema de mantenimiento preventivo se debe tener en cuenta:

- Experiencias pasadas: Un historial del mantenimiento realizado anteriormente, donde se evidencie las fallas, las causas y el procedimiento realizado para solucionar los problemas previos.
- Características del activo: Horas de trabajo, el tipo de activo, la criticidad.
- Recomendaciones del fabricante.

El mantenimiento preventivo pretende conocer el estado del activo para a partir de ello aplicar el respectivo procedimiento a fin de extender la vida útil del activo mismo y así mantener la continuidad de su servicio. Esto permite ahorrar en mantenimiento correctivo, evitar las paradas de producción por fallas y reducir las horas extras.

2.2.3. Mantenimiento proactivo

El mantenimiento proactivo o también llamado mantenimiento de precisión se basa en el diseño del activo. Las tareas están dirigidas a la búsqueda de causa-raíz de la falla y su solución.

Mayormente las fallas de un activo son causadas por la incorrecta operación y las labores previas al mantenimiento. Mantener y operar proactivamente un equipo reduce la probabilidad de falla a corto plazo. Para ello se debe realizar un mantenimiento justo y necesario, con los procedimientos óptimos (Trocel).

El mantenimiento proactivo emplea herramientas de calidad para realizar el análisis del activo (Espinosa):

- Análisis causa-raíz: Esta técnica ayuda a determinar las causas de la falla, sus consecuencias y frecuencia de aparición, para poder mitigarlas o eliminarlas.
- Diagrama de Pareto: Se emplea para organizar datos en orden ascendente. Permite evaluar todas las fallas y las causas asignando un orden de prioridad.
- Diagrama de Ishikama: Es una representación gráfica para el análisis de causa-raíz. Posee entradas (causas y razones) y una salida (el problema o evento).
- 5 porqués: Ante un problema se pregunta ¿Por qué? ¿Qué causó el problema? Estas preguntas permiten separar los síntomas de las causas del problema.

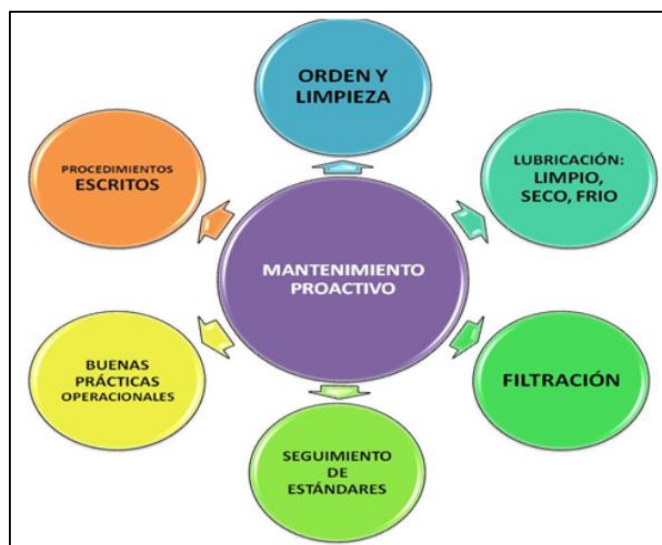


Figura 11. Criterios para realizar el mantenimiento proactivo.

Fuente: (Trocel)

2.3. Metodologías de optimización (RCM, PMO, TPM)

2.3.1. RCM: Mantenimiento centrado en la confiabilidad

El RCM es una metodología utilizada para la identificación de averías ya conocidas (que ya se han dado anteriormente) o potenciales para determinar sistemáticamente qué debe hacerse para que los activos continúen desempeñando su función en su contexto operacional (Ponce, 2018).

Esta metodología busca preservar la función del sistema mediante la identificación de fallas funcionales y modos de falla dominantes, priorizando las fallas funcionales de acuerdo con las consecuencias. En base a la identificación de fallas se selecciona las tareas de mantenimiento aplicables y eficientes.

Una de las principales herramientas del RCM es el AMFE (Análisis de modos de falla y sus efectos) que se usa para definir, identificar y eliminar fallas conocidas o potenciales, problemas, errores, desde el diseño, proceso y operación de un sistema, antes que afecte al cliente.

La metodología RCM se basa en la priorización de fallos y para analizarlos correctamente se siguen 7 preguntas (Ponce, 2018):

- ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociado al activo en su actual contexto operacional?
- ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
- ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
- ¿Qué sucede cuando ocurre una falla?
- ¿Cuál es la consecuencia de cada falla?

- ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir una falla?
- ¿Qué hacer si no puede encontrarse una tarea proactiva adecuada?

Para estructurar correctamente un RCM se deben cumplir una serie de fases (¿Qué es RCM?, 2016):

- Fase 0: Codificación y listado de los elementos, equipos y subsistemas que componen el sistema. Ayudaría realizar un inventario y un croquis para facilitar la ubicación de cada componente del sistema.
- Fase 1: Listado de funciones y especificaciones. Estudio detallado del funcionamiento del sistema.
- Fase 2: Determinación de fallos funcionales y fallos técnicos.
- Fase 3: Determinación de modos de fallo.
- Fase 4: Estudio de las consecuencias de los fallos. Criticidad
- Fase 5: Determinación de las medidas preventivas que eviten o atenúen las consecuencias de los fallos.
- Fase 6: Agrupación de las medidas preventivas en diferentes categorías. Elaboración de un plan de mantenimiento.
- Fase 7: Puesta en marcha de las medidas preventivas.

2.3.2. PMO: Optimización del mantenimiento planeado

La PMO es una metodología diseñada para revisar los requerimientos actuales de mantenimiento, el historial de fallas y la información técnica de los activos en operación.

Es una metodología que nace debido a las limitaciones del mantenimiento preventivo, ya que el activo puede fallar antes de lo previsto, es decir ocurren fallas temporales y se cae en un círculo vicioso de mantenimiento correctivo (ver Figura 12) lleno de reparaciones temporales que a largo plazo se vuelven definitivas.



Figura 12. Ciclo del mantenimiento correctivo.

Fuente: Adaptado de Steve Turner 2000.

La PMO es más flexible que el RCM ya que inicia en la fase de operación, por lo que trabaja con los equipos funcionales de la planta y reconoce a los que son útiles y los que son inadecuados. Esta metodología identifica las fallas críticas y sus causas dentro del historial de fallas para determinar cuales se pueden prevenir con actividades de mantenimiento proactivo.

La principal herramienta de la PMO es el análisis de confiabilidad el cual estima la probabilidad de que un activo pueda operar durante un periodo de tiempo sin que pierda la función. Una vez realizado este análisis los encargados del mantenimiento pueden escoger el plan de mantenimiento más eficaz, de acuerdo con las necesidades y los demás factores de normativa y seguridad ambiental de la organización (García, 2007).

Para implementar una PMO se debe seguir una secuencia de pasos:

- Paso 1: Establecimiento de las funciones y tareas.
- Paso 2: Análisis de los Modos de Falla (FMA).
- Paso 3: Racionalización y revisión del FMA.
- Paso 4: Análisis funcional.
- Paso 5: Evaluación de las consecuencias.
- Paso 6: Determinación de las Políticas de Mantenimiento.
- Paso 7: Agrupación y Revisión de Procesos.
- Paso 8: Implementación y aprobación de los programas.
- Paso 9: Programa dinámico y mejoramiento continuo.

2.3.3. TPM: Mantenimiento productivo total

El TPM es una metodología desarrollada en Japón que pretende mantener disponible a los equipos para producir a su máxima capacidad, sin paradas programadas para eliminar las pérdidas de producción debido al estado de los equipos. Esto pretende seguir una filosofía de cero averías, cero tiempos muertos, cero pérdidas de rendimiento y cero defectos causados por el mal estado de los equipos (¿Qué es TPM?, 2016).

Esta metodología pretende eliminar las seis grandes pérdidas que se mencionan a continuación:

- Fallas del equipo que producen pérdidas de tiempo
- Ajustes de máquinas (tiempo muerto) que producen pérdida de tiempo al iniciar una nueva operación
 - Marchas en vacío, esperas y averías menores que ocurren durante la operación,
 - Velocidad de operación reducida, debido a que el equipo no funciona a su máxima capacidad no se obtiene la velocidad de producción deseada.
- Defectos en el proceso, al obtener un producto defectuoso se rehacen partes de él provocando pérdida de tiempo y producción.

- Pérdidas de tiempo provocadas por la puesta en marcha de un proceso, por los periodos de pruebas, etc.

El TPM se apoya en ocho pilares para eliminar estas grandes pérdidas (Universidad ESAN, 2020):

- Mejoras enfocadas: busca la causa primaria de los problemas. Las acciones están dirigidas a mejorar la productividad de la organización, para evitar pérdidas y aumentar los ingresos económicos.
- Mantenimiento autónomo: es el mantenimiento que hace el propio operador. Implica capacitar y entrenar al operario para que haga tareas de mantenimiento de primer nivel para evitar posibles paros de planta.
- Mantenimiento planificado: es el mantenimiento preventivo programado. Tiene como objetivos, erradicar las fallas, reducir el tiempo de parada y disminuir gastos por mantenimiento,
- Mantenimiento de calidad: se realizan acciones para evitar los defectos en el proceso. Este mantenimiento busca garantizar la calidad del producto para satisfacer al cliente.
- Prevención del mantenimiento: se implementa durante el diseño, fabricación y manejo de equipos para reducir gastos por mantenimiento
- Actividades de Departamentos Administrativos y de Apoyo: brinda recomendaciones y ayuda al personal de mantenimiento.
- Formación y adiestramiento: se analiza los conocimientos del operario que ha adquirido con las capacitaciones. El operario debe ser capaz de entender el funcionamiento e identificar el problema.
- Gestión de seguridad y entorno: en este pilar se estudia e identifica los riesgos a los que está expuesto el personal.

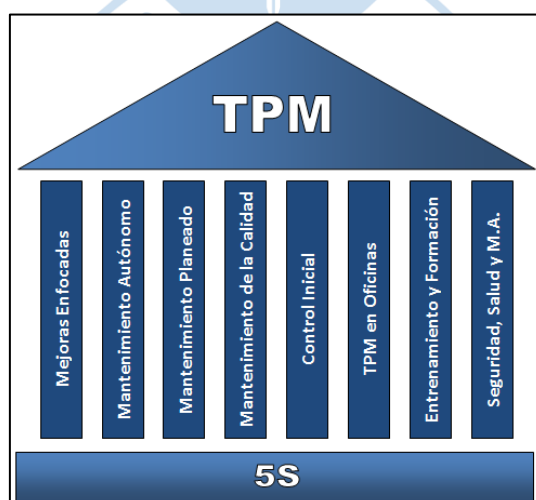


Figura 13. Pilares del TPM

Fuente: (Sejzer, 2016)



Capítulo 3

Sistemas expertos orientado al mantenimiento industrial

3.1. Protagonistas

Las personas que participan en el desarrollo de un Sistema Experto en base al papel que ejercen, 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 de un Sistema Experto.

3.1.1. Desarrollador

El desarrollador o ingeniero de conocimiento es uno de los principales protagonistas en el desarrollo de un Sistema Experto, y los roles que realiza son los siguientes:

- Ayuda al experto en la labor de explicar los conocimientos para una buena posterior estructuración de estos.
- Codifica los conocimientos en forma de reglas en la representación que utiliza la herramienta computacional seleccionada.
- Aprende las particularidades del dominio, tarea específica y del ambiente donde se implementará el Sistema Experto.
- Analiza los procedimientos que realiza el experto en la resolución de un problema.
- Detecta inconsistencias dentro de la lógica de solución de problemas.
- Refina la base de conocimientos por medio de la realización de pruebas.

Los ingenieros del conocimiento para poder realizar todas las labores mencionadas tienen que tener una formación adecuada tanto en lenguajes de programación, técnicas de inteligencia artificial y entornos de trabajo. Sin embargo, existen aspectos muy importantes para que todo se puede llevar a cabo de una manera eficiente y cómoda, los ingenieros del conocimiento tienen que desarrollar el conocimiento sobre las relaciones interpersonales y los mecanismos que rigen la toma de decisiones, ya que, en el desarrollo de un Sistema Experto, los ingenieros de conocimiento y los expertos trabajan muy unidos. (*Metodología Para El Desarrollo de Sistemas Expertos*, 2014).

Por último, los desarrolladores tienen que tener desarrollada la capacidad de observación, ya que con eso se podrá determinar, si el experto realmente trabaja mientras está siendo observado.

3.1.2. Experto

La existencia de verdaderos expertos en el área del problema a resolver es el primer requisito para que se pueda desarrollar un Sistema Experto, ya que, si no existe una fuente de conocimiento y experiencia, el desarrollo fracasaría.

Los roles o tareas que tienen los expertos son:

- Proveer conocimiento del dominio y de la tarea específica.
- Explicar sus métodos y conocimientos a los ingenieros de conocimiento.

Para que las tareas mencionadas se puedan realizar se necesita claramente de un experto, y por ello, es necesario resaltar 2 puntos importantes, encontrar un buen experto que esté dispuesto a colaborar en la construcción y desarrollo de un Sistema Experto no es fácil, y contar con expertos que además sean capaces de articular y explicar los métodos que usan para resolver problemas, tampoco es fácil. Si los expertos no cumplen con todo lo necesario, poco podrían hacer los ingenieros de conocimiento en este caso.(Escobar Villegas, 2008).

3.1.3. Usuario

El usuario es aquella persona que regularmente se encuentra utilizando el Sistema Experto, para la solución de los problemas que se presenten en el campo o ambiente que se esté trabajando. El usuario puede ser tanto un experto, como una persona sin conocimiento alguno del campo de trabajo. Si el usuario es un experto, el Sistema Experto funcionaría como una herramienta para la solución del problema específico, mientras que, en el caso de que el usuario sea una persona no experta, el Sistema Experto serviría como instrumento para hallar la solución al problema sin que esta sea validada por alguien más, es decir, la solución que brinde el Sistema Experto sería la solución a implementar.

Mencionado lo anterior, es por ello importante que el Sistema Experto esté desarrollado de modo que al usuario le resulte fácil y natural preguntar y obtener cualquier detalle del sistema.(Escobar Villegas, 2008)

3.1.4. Administración

Son los protagonistas encargados de identificar problemas relacionados con el sistema, aprobar la actualización o realización además de asignar los recursos necesarios para cumplir con esta labor. (Carrillo, 1987)

3.2. Metodología

3.2.1. Determinar el problema específico

Para identificar el problema específico a tratar el desarrollo del Sistema Experto debe dar respuesta a tres condiciones básicas:

- Seleccionar la aplicación que será el entorno en la que se desarrollará el Sistema Experto, bajo un dominio dado.
- Determinación de las necesidades que debe satisfacer el Sistema Experto y evaluación de los recursos para su desarrollo.
- Aceptación por la dirección y usuarios del proyecto.

La función básica es la tarea de extracción de conocimientos de un experto de tal manera que los posibles riesgos, fallas y costos sujetos a ello se reduzcan al máximo. Estos conocimientos deben ser completos, actualizados y deben contener la esencia de la experiencia teniendo como condición que el ingeniero del conocimiento conozca técnicas de resolución de problemas, teorías sobre modelos de razonamiento, inconsistencias verbales en la expresión del conocimiento, así como imprecisiones de la memoria y la capacidad de observación. (Carrillo, 1987)

Así, mientras más específico sea el problema se hará más sencillo el desarrollo del sistema debiéndose analizar el sistema técnico desde tres puntos de vista:

- **Análisis:** comprende la evaluación del estado técnico del sistema.
- **Modificación:** Comprende el control de las condiciones de operación además de la manutención de las actividades de manutención.
- **Síntesis:** Se establecen criterios de reemplazo y rediseño de componentes mecánicos del sistema técnico. (Villegas, 2008)

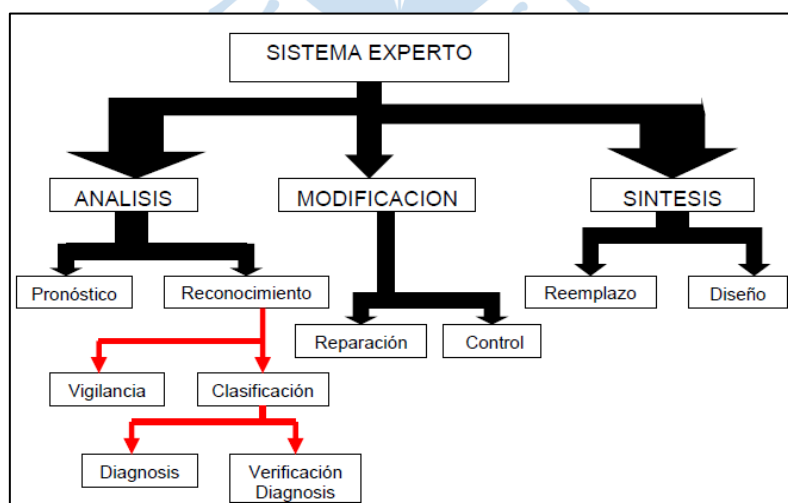


Figura 14. Sistemas expertos en el mantenimiento de sistemas técnicos.

Fuente: (Villegas, 2008)

3.2.2. Determinar estructura del sistema

El objetivo consiste en determinar de qué manera el experto organiza el conocimiento de cada problema en específico, de qué manera representa los conceptos e hipótesis y de qué forma maneja el conocimiento y los datos inconsistentes, exactos o imprecisos relativos a cada problema.

Determinar la estructura del Sistema Experto implica expresar los conceptos clave y las relaciones de una manera formal dentro de un marco sugerido por un lenguaje de construcción de un Sistema Experto. Las partes que se contemplan se citan a continuación.

- **Contenido:** surge del dominio de conocimiento que se hizo explícito durante la formalización, es decir, la estructura de datos, reglas de inferencia y estrategias de control necesarias para la resolución del problema.

- **Forma:** condicionada y especificada mediante la herramienta elegida para desarrollar el sistema.

- **Integración:** combinar, verificar y organizar los distintos elementos de conocimiento con el fin de eliminar equiparaciones globales equivocadas entre estructuras de datos y reglas o estructuras de control.

- **Implantación:** permitirá verificar la efectividad de las decisiones de diseño tomadas durante las primeras fases del desarrollo. Esto implica una alta probabilidad de que el código sea revisado y posteriormente desechado durante el proceso (Carrillo, 1987).

Además, se efectúa el desarrollo de las interfases con el usuario siendo uno de los trabajos más importantes. (Carrillo, 1987)

Además, toda estructura debe cumplir tres características:

- Producir resultados correctos.
- Tener sentido para el desarrollador.
- Ser fácil de entender y mantener. (Villegas, 2008)

3.2.3. Determinar el grupo de expertos

La confiabilidad de un Sistema Experto depende mucho de las reglas y conocimientos que lo componen. Por ello es necesario elaborar un método para elegir al adecuado grupo de expertos, ya que estos pondrán sus conocimientos especializados a disposición del Sistema Experto.

En mantenimiento, el método de selección de expertos debe cubrir las áreas de diseño, fabricación, operación y manutención. Los pasos de selección son los siguientes (Villegas, 2008):

- Paso 1: Definir el número necesario de especialistas en el área a dar mantenimiento.
- Paso 2: Seleccionar a las personas que cumplan con el perfil de la especialidad.

- Paso 3: Seleccionar a los especialistas que tengan mayor conocimiento en el área. A los seleccionados se les llamará expertos.
- Paso 4: Seleccionar al grupo de expertos que tengan una opinión coherente acorde a una serie de preguntas realizadas respecto al área de mantenimiento en el que trabajarán.

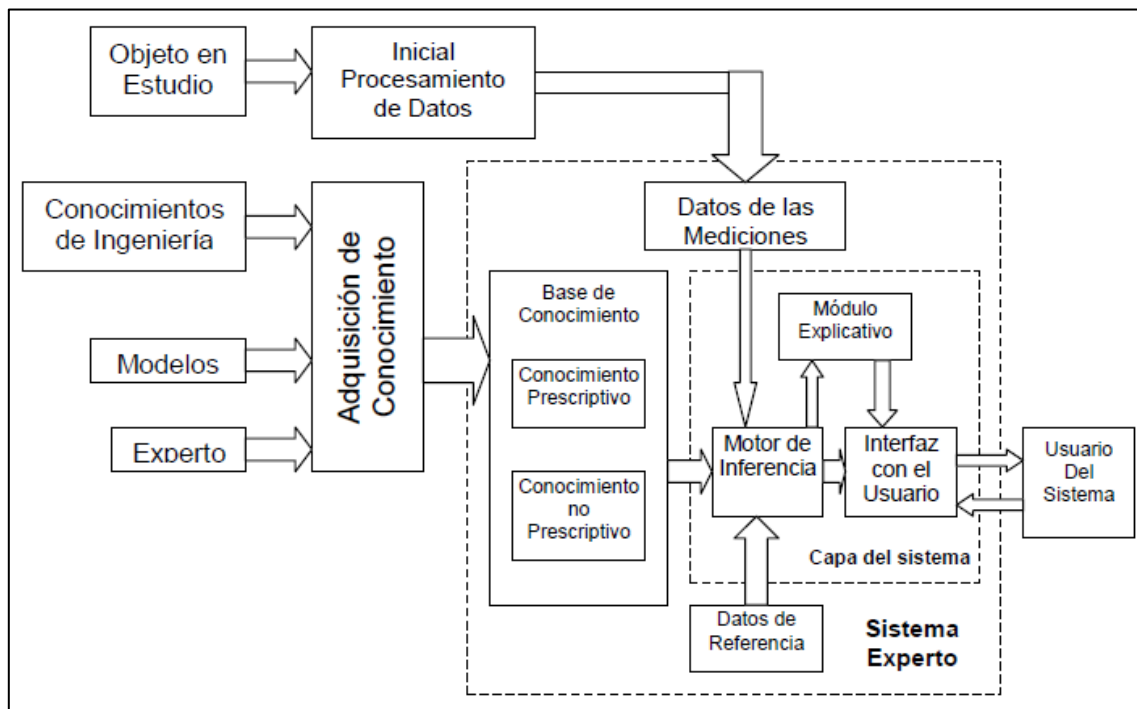


Figura 15. Diseño de la estructura de un Sistema Experto.

Fuente: (Villegas, 2008)

Los responsables de llevar a cabo el proceso de selección y de supervisarlo son el administrador y el desarrollador, ya que este proceso consta de 3 fases de selección y para cada fase se aplican diferentes criterios de evaluación.

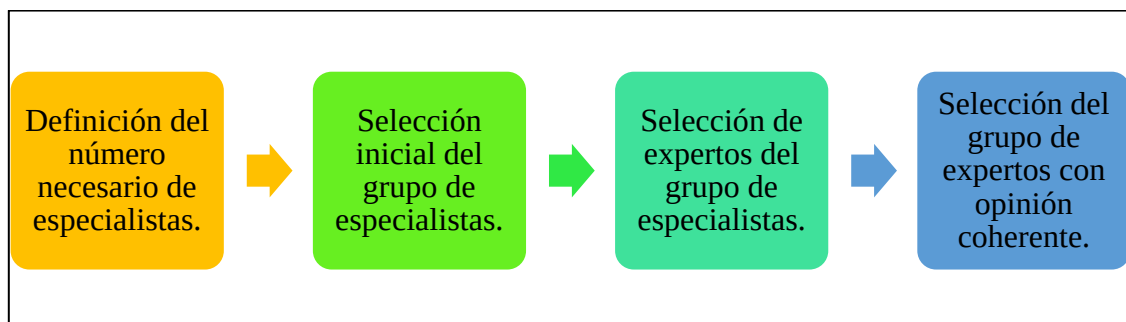


Figura 16. Pasos para determinar el grupo de expertos en mantenimiento.

Fuente: Adaptado de (Villegas, 2008)

3.2.4. Documentar los pasos realizados por el experto para resolver el problema

La documentación de los procedimientos realizados por los expertos facilita el desarrollo del Sistema Experto. Si se documenta toda la lógica del sistema, entonces cada regla será un dato que puede almacenarse como una variable (acorde a la forma sintáctica del programa) para luego subirse a la base de conocimientos y el Sistema Experto disponga de ellos para dar una solución a la problemática (Villegas, 2008).

Para poder documentar los pasos, previamente se debe adquirir el conocimiento dado por el grupo de expertos o diferentes fuentes de información confiable.

Todo el conocimiento adquirido se divide en hechos o reglas, los cuales se cargan a una base de conocimientos mediante un proceso lógico.

Es necesario que todo hecho tenga al menos una regla que lo contenga, caso contrario, el hecho no cumpliría ninguna función y sería inútil para el Sistema Experto (Soto, 2007).

3.2.5. Adquisición de conocimientos

Una vez identificado el problema se determinan los elementos que intervendrán en su solución (reglas de inferencia, procedimientos, restricciones, conceptos, etc). Estos elementos o información se pueden obtener de distintas fuentes como: conocimientos del grupo de expertos, libros, revistas de ciencia, manuales, reglamentos, datos empíricos o datos gráficos. Toda esta información debe pasar por un proceso de selección y se escoge los conocimientos básicos y necesarios para el adecuado funcionamiento del Sistema Experto (Soto, 2007).

La adquisición del conocimiento consta de 5 etapas (Alonso, 1992):

• **Identificación:** Se define el problema a partir de las fuentes de conocimiento. Por lo que incluye:

- ✓ Selección de los expertos que aportarán su conocimiento y experiencia al Sistema Experto.
- ✓ Delimitación las características del problema y se estructura el proceso para solucionarlo.
- ✓ Definición las fuentes de conocimiento.
 - ✓ **Conceptualización:** Abarca los conceptos y las relaciones propios del problema que se incorporarán en el Sistema Experto.

Para una buena conceptualización se debe identificar los procesos de solución del problema y sus respectivas restricciones, los datos que se proporcionan y los que se infieren, las subtareas y las estrategias de cada una, entre otros conceptos.

- ✓ **Formalización:** Los conceptos abarcados en la etapa anterior se estructuran en esquemas de representación.

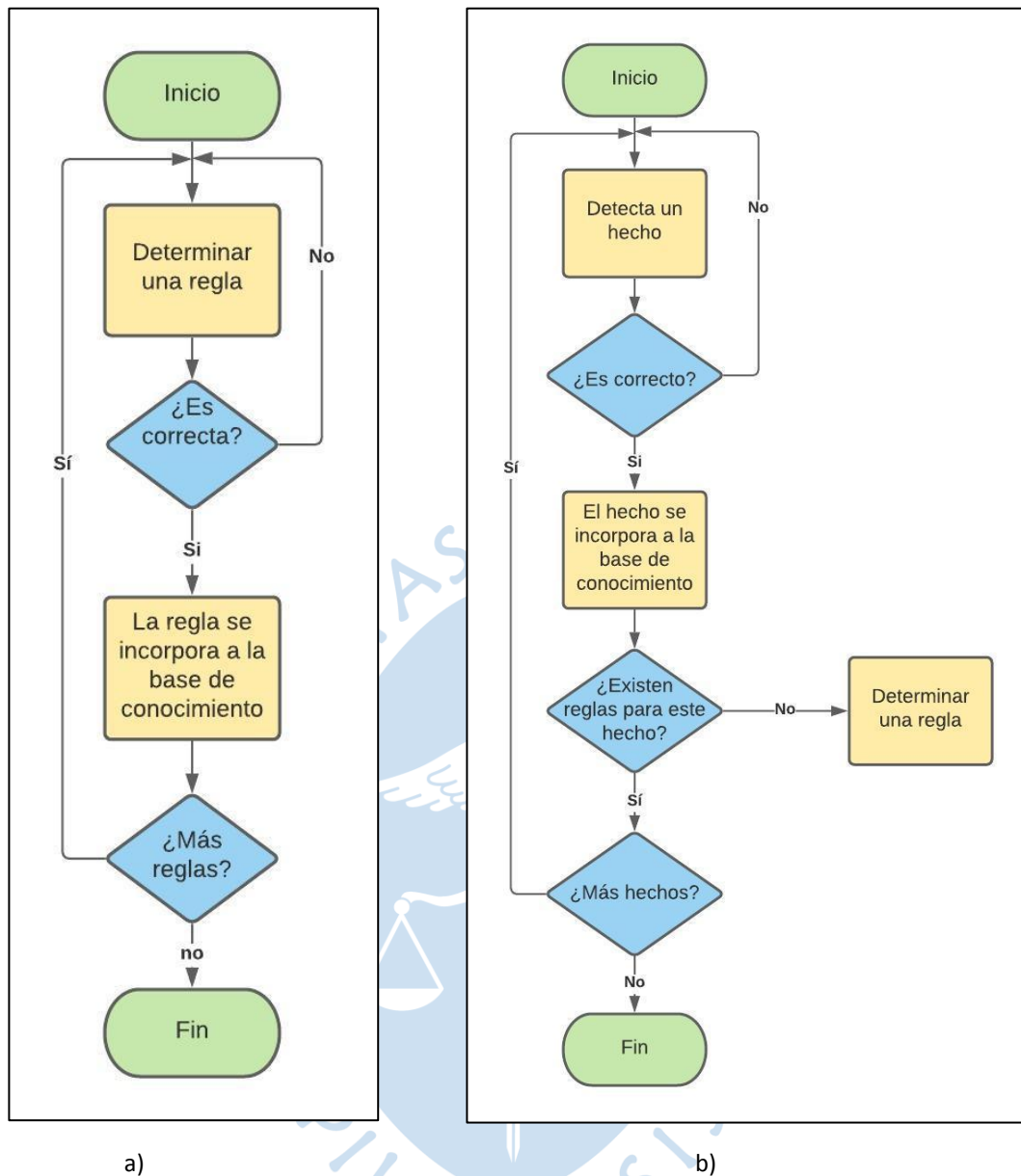


Figura 17. a) Proceso lógico para cargar una regla a la base de conocimientos. b) Proceso lógico para cargar un hecho a la base de conocimientos.

Fuente: Adaptado de (Soto, 2007)

Esta etapa se centra en los datos del sistema, verifica si los datos son confiables, si son redundantes, si son suficientes, como se relacionan entre ellos, etc.

- **Implantación:** Se desarrolla el prototipo gracias al conocimiento formalizado y a una herramienta de resolución compatible.
- **Prueba:** Se evalúa el prototipo y el esquema de representación que incorpora. Los factores más importantes que afectan el rendimiento son:

- ✓ **Entrada-salida:** el proceso de adquisición del conocimiento puede presentar deficiencias, en consecuencia, a las conclusiones del prototipo inadecuadas.

- ✓ Reglas de inferencia: pueden ser incorrectas, incompletas o hasta puede haberse omitido alguna. Esto afecta la lógica del razonamiento.
- ✓ Estrategias de control: si la estrategia de control no se ajusta a las indicaciones del experto, se producen errores en la respuesta del sistema.
- ✓ Ejemplos de prueba: una incorrecta prueba hará fallar el Sistema Experto frente a distintos problemas o situaciones que se le presentes.

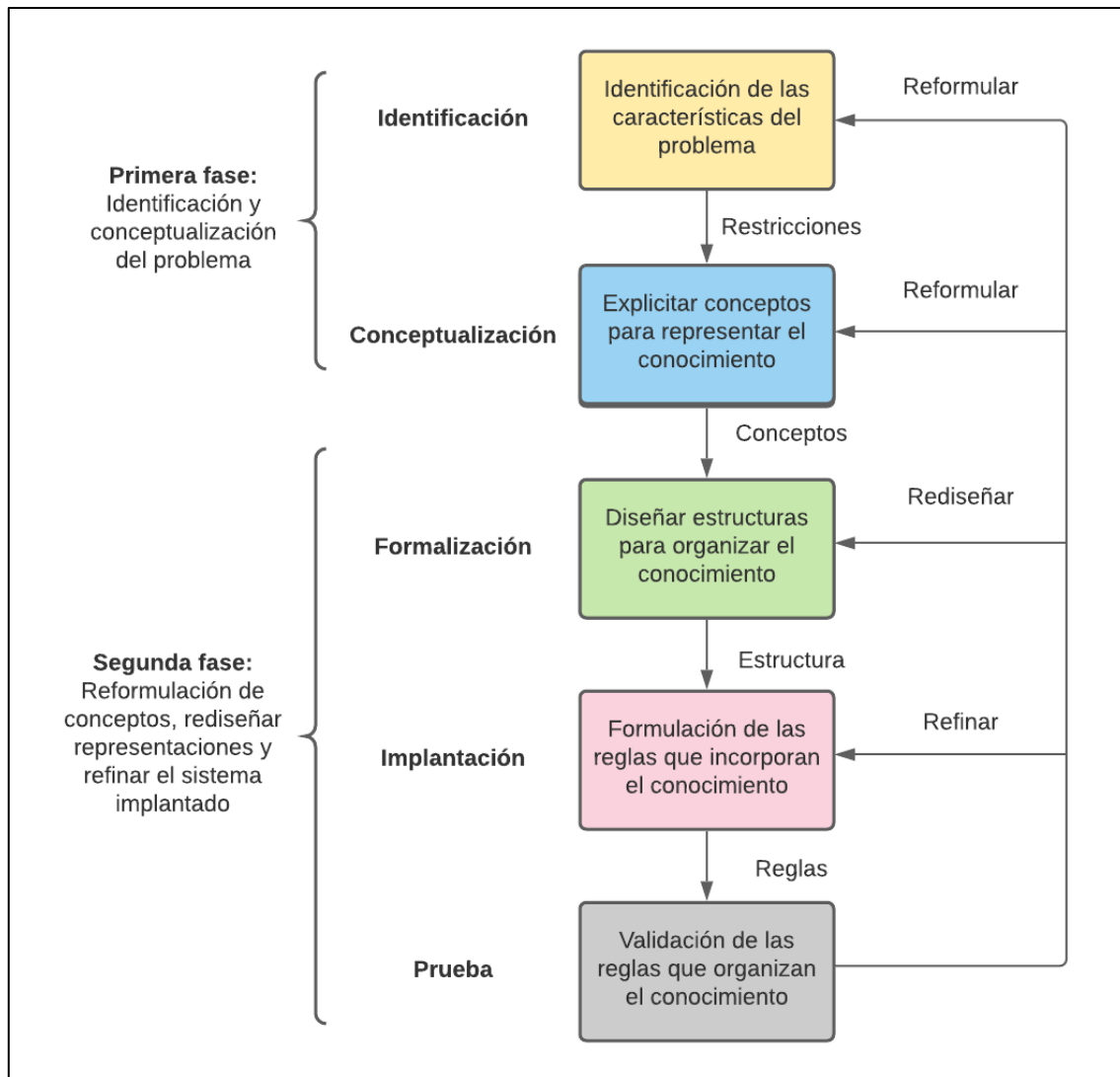


Figura 18. Etapas de la adquisición del conocimiento.

Fuente: Adaptado de (Alonso, 1992)

3.2.6. Construcción del sistema experto

La construcción de un Sistema Experto se puede dividir en 3 etapas o fases, la primera etapa es la de recolección de información para generar la base de conocimiento en la que se fundamente o sustente el Sistema Experto. La segunda etapa es la elaboración del sistema

experto. La tercera etapa es la validación o verificación del Sistema Experto. La fase de validación o verificación del Sistema Experto, debido a su importancia, será visto en un apartado más extenso. (Giraldo, G. A. M., & Pomar, 2003)

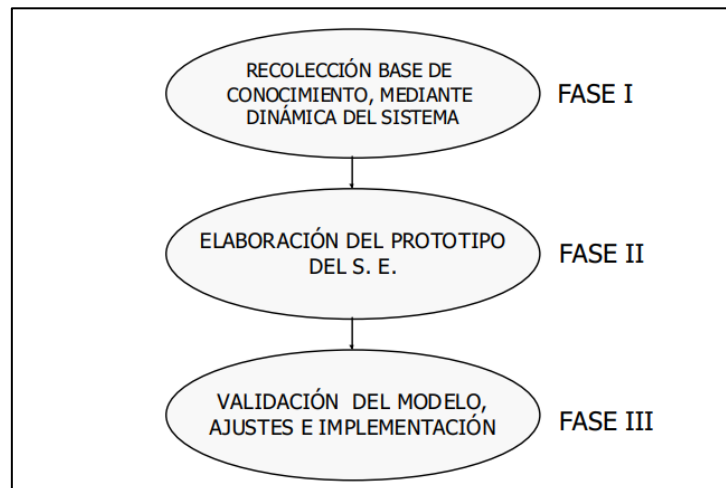


Figura 19. Estructura general de la construcción de un Sistema Experto.

Fuente: (Giraldo, G. A. M., & Pomar, 2003).

3.2.6.1. Recolección del conocimiento. En esta etapa se basa en la adquisición del conocimiento, el cual puede ser adquirido mediante el conocimiento de un experto en el área, libros, tesis, diagnósticos y estudios realizados en el sector de estudio, etc.

Para la recolección del conocimiento en el que se basará el Sistema Experto podemos seguir los siguientes pasos:

- Paso 1: Debemos determinar las áreas críticas en las que se implementará el Sistema Experto, esta área será el sector en el que el Sistema Experto realizará los diagnósticos.
- Paso 2: Determinar el método de recolección de información, el procesamiento de la información más relevante y la síntesis de toda la información recolectada en un modelo. Mediante la construcción de matrices de causalidad podemos organizar el conocimiento de cada experto y mediante índices cuantitativos asignarle un valor a cada conocimiento.
- Paso 3: Elaboración de esquemas para el proceso de análisis y síntesis de la información.
- Paso 4: Determinar el criterio de evaluación de la información. Mediante los índices cuantitativos podemos asignarle un valor a un conocimiento, por ejemplo, si los expertos y las fuentes de información como investigaciones, tesis, libros concuerdan con un conocimiento, el índice será grande, de lo contrario, si existe opiniones dispares por parte de los expertos, el índice tendrá un valor pequeño.

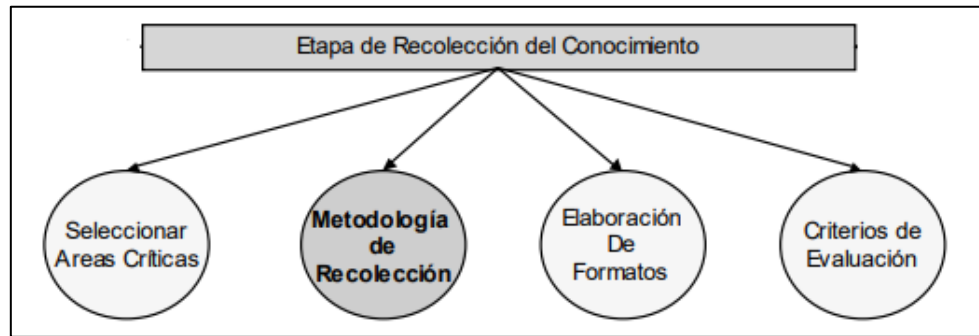


Figura 20. Metodología desarrollada para la etapa de recolección del conocimiento.

Fuente: (Giraldo, G. A. M., & Pomar, 2003)

Elaboración del prototipo

En esta etapa se elabora un prototipo que modela la dinámica del sistema y que permita entender su funcionamiento.

Para la elaboración de un prototipo del S.E podemos seguir los siguientes pasos:

- Paso 1: Capacitar a los investigadores y desarrolladores sobre la dinámica del sistema por parte de los expertos. Capacitación sobre las herramientas de diagnóstico. Capacitación en las herramientas de simulación y lenguajes utilizados en el proceso.
- Paso 2: Desarrollo de los modelos por área seleccionada o de interés. Desarrollo de un modelo, analizando las variables influyentes, parámetros, políticas.
- Paso 3: Integración de los diferentes modelos y simularlos en conjunto. Se debe evaluar y contrastar el modelo junto a expertos de las diferentes áreas. Mediante herramientas estadísticas podemos validar el modelo o mejorarlo de ser el caso.
- Paso 4: Preparar un material didáctico que permita a los operarios entender el funcionamiento del prototipo del Sistema Experto desarrollado.

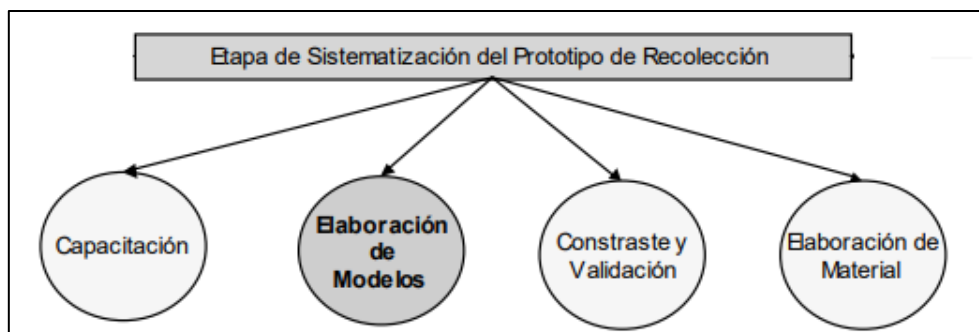


Figura 21. Metodología desarrollada para la elaboración del prototipo.

Fuente: (Giraldo, G. A. M., & Pomar, 2003)

3.2.7. Verificación del sistema experto

La verificación es una de las etapas más importantes. En esta etapa se trata de comprobar si se ha construido correctamente un Sistema Experto. Debemos asegurarnos de que el software que hemos o estamos diseñando, no contenga errores y que el Sistema Experto diseñado cumple con todos los requisitos y las especificaciones que se solicitan, es decir, con las especificaciones de diseño. (Mosqueira-Rey & Moret-Bonillo, 2000)

Para este proceso se analizan y verifican las siguientes tareas:

3.2.7.1. Verificación del cumplimiento de las especificaciones. Este análisis puede ser llevado a cabo por desarrolladores, usuarios, expertos y/o grupo independiente de evaluadores, para determinar si el Sistema Experto cumple con todas las especificaciones requeridas.

En esta tarea se verifican las siguientes características del Sistema Experto:

- Si se ha implementado el paradigma adecuado.
- Si se ha empleado un razonamiento correcto.
- Si el diseño e implementación permiten una conexión externa con otro software externo.
- Si la interfaz cumple con los requisitos mínimos.
- Si el programa es sencillo de entender y operar.
- Si puede trabajar en tiempo real.
- Si cumple con los protocolos de seguridad de la fábrica o empresa.
- Si el programa está protegido ante modificaciones o alteraciones maliciosas.

3.2.7.2. Verificación de los mecanismos de inferencia. En caso de construir mecanismos de inferencia propios se deberá aplicar las técnicas de ingeniería de software diseñadas para la verificación del correcto funcionamiento de un software.

Pero para el diseño de un Sistema Experto es aconsejable usar mecanismos de inferencia certificados, es decir, *Shell* comerciales, ya que estas han sido realizadas por desarrolladores expertos y han sido mejoradas a lo largo del tiempo. La responsabilidad que recaería en el desarrollador sería la elección de la *Shell* adecuada para el proyecto.

Además del uso de estas herramientas comerciales, es bueno realizar pruebas para comprobar que el Sistema Experto se comporta de forma adecuada.

3.2.7.3. Verificación de la base de conocimientos. Esta etapa solo es responsable el ingeniero o los ingenieros del que se extraen los conocimientos.

Esta verificación se basa en “anomalías”. Una anomalía es un comportamiento poco común y se considera un error potencial. Este tipo de verificación nos asegura que el sistema ha sido diseñado e implementado de forma correcta ya que, al presentar una anomalía en el proceso, el Sistema Experto debería indicar que algo no es correcto.

Existen pruebas que se hacen para comprobar que la base de los conocimientos es consistente y completa. Una de estas pruebas es la que examina la consistencia y la completitud de la base del conocimiento del Sistema Experto.

Consistencia	Reglas redundantes	$p(x) \wedge q(x) \rightarrow r(x)$ $q(x) \wedge p(x) \rightarrow r(x)$
	Reglas conflictivas	$p(x) \wedge q(x) \rightarrow r(x)$ $p(x) \wedge q(x) \rightarrow \neg r(x)$
	Reglas englobadas en otras	$p(x) \wedge q(x) \rightarrow r(x)$ $p(x) \rightarrow r(x)$
	Reglas circulares	$p(x) \rightarrow q(x)$ $q(x) \rightarrow r(x)$ $r(x) \rightarrow p(x)$
	Condiciones IF innecesarias	$p(x) \wedge q(x) \rightarrow r(x)$ $p(x) \wedge \neg q(x) \rightarrow r(x)$
Completitud	Valores no referenciados de atributos	Ocurre cuando algunos valores, del conjunto de posibles valores de un atributo, no son cubiertos por la premisa de ninguna regla.
	Valores ilegales de atributos	Una regla referencia valores de atributos que no están incluidos en el conjunto de valores válidos para ese atributo.
	Reglas inalcanzables	$p(x) \rightarrow r(x)$ $p(x)$ no aparece como conclusión de otra regla ni puede obtenerse del exterior (raz. progresivo)
	Reglas sin salida	$p(x) \wedge q(x) \rightarrow r(x)$ $r(x)$ no es una conclusión final y no aparece en la premisa de ninguna regla (raz. progresivo)

Figura 22. Verificación de la consistencia y la completitud en bases de conocimientos.

Fuente: (Mosqueira-Rey & Moret-Bonillo, 2000)

3.2.8. Mantenimiento del sistema experto

El mantenimiento de un Sistema Experto consiste en actualizar la base del conocimiento de este al descubrir nuevas anomalías o al cambiar las normas internacionales de estándares de calidad, seguridad y eficiencia. Cuando un usuario informa de un problema nuevo, el Sistema Experto no tendrá una respuesta ante este problema, por lo que será necesario actualizar la base del conocimiento del Sistema Experto por si este problema o anomalía vuelve a ocurrir. (Escobar Villegas, 2008).

Capítulo 4

Casos de sistemas expertos aplicados al mantenimiento industrial

4.1. Sistema experto para el mantenimiento predictivo en una central hidroeléctrica

El diseño del prototipo del sistema experto se realizó sobre una central que posee 3 grupos alternador-turbina, junto con un sistema de servicios generales común a los 3 grupos.

Para el desarrollo, estos grupos fueron divididos en unidades funcionales, las cuales son las siguientes: toma de aguas, turbina, alternador, sistema de excitación, transformador, sistema de agotamiento.

El prototipo del sistema experto se realizó en base a una parte de la central. Las unidades funcionales de esta parte escogida son el alternador y la turbina. Para el sistema experto de estas 2 unidades funcionales se realizaron 200 reglas de producción. (Benavides, A., Saludes, S., de Miguel, L. J., & Perán, 2009)

4.1.1. Esquema del prototipo

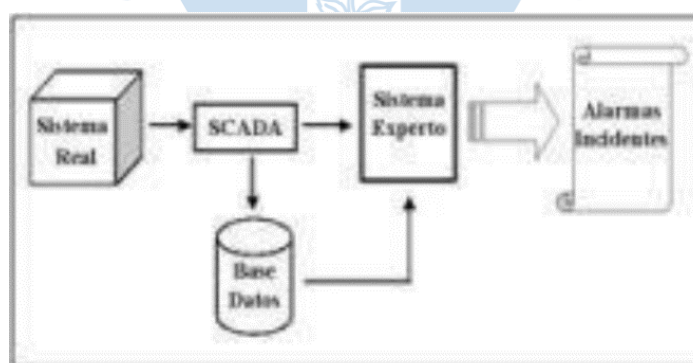


Figura 23. Esquema general del sistema experto planteado.

Fuente: (Benavides, A., Saludes, S., de Miguel, L. J., & Perán, 2009)

El primer bloque corresponde a la central hidroeléctrica y representa el sistema real. Un sistema SCADA, es decir, un sistema de adquisición de datos el cual permitirá obtener las variables para el funcionamiento del sistema experto. La base de datos del esquema almacenará los históricos proporcionados por el sistema SCADA. El sistema experto, el cual es

alimentado por el sistema SCADA y por los históricos almacenados en la base de datos se encargará de realizar el diagnóstico del sistema. La respuesta del sistema se podrá observar en una interfaz de usuario. (Benavides, A., Saludes, S., de Miguel, L. J., & Perán, 2009)

4.1.2. Funcionamiento del prototipo



Figura 24. Esquema de funcionamiento del sistema experto planteado.

Fuente: (Benavides, A., Saludes, S., de Miguel, L. J., & Perán, 2009)

En la etapa de observación el sistema experto permanece en esta etapa hasta que se desencadena una regla como consecuencia de la producción de un fallo. Durante esta etapa se realiza un chequeo continuo de todas las reglas para comprobar si se producen condiciones de fallo o no. (Benavides, A., Saludes, S., de Miguel, L. J., & Perán, 2009)

Se pasa a la etapa de producción de fallos cuando en el sistema monitoreado se desencadena un fallo. Este fallo se debe al incumplimiento de las reglas establecidas para este sistema.

En la etapa de visualización en esquema se indica cuál fue la regla que desencadenó el fallo para así poder arreglarlo. Mediante bloques se puede representar cada subsistema e indicar con color rojo la zona en la se originó el fallo, y cuando este se solucione, mostrar el bloque de color verde.

En la etapa de visualización de incidentes se visualiza cual fue la probabilidad para que el fallo en concreto se diera. Mientras que en la etapa de visualización de reglas se muestra todas las condiciones que se tuvieron que cumplir para que el fallo tuviera lugar.

En la etapa de corrección de accidentes se le debe indicar al sistema experto que el fallo ha sido corregido. Mediante la interfaz del sistema experto, se debe indicar que el accidente ha sido corregido, esto cambiará el bloque de color rojo de la interfaz a un color verde, lo cual indica que el fallo en subsistema ha sido corregido y el sistema experto debe

operar con normalidad. En caso no se haya realizado un correcto mantenimiento y continúe la violación a la regla, el sistema experto nuevamente indicará un fallo.

4.2. Sistema experto de ayuda al mantenimiento de osciloscopios analógicos.

En la actualidad la instrucción al personal especializada en los mantenimientos preventivo y correctivo de equipos electrónicos complejos es una tarea de gran importancia teniendo como ejemplo la asistencia técnica a osciloscopios que son un instrumento fundamental para el personal de mantenimiento que trabaja en los sectores industriales y educativa conservando la disponibilidad técnica y la competitividad (Carballea, Gonzales, & Lezcano).

El Sistema Experto SENIM ha sido diseñado en la Universidad Central de las Villas, Cuba, como un asistente técnico para la búsqueda metódica de fallas en algunos modelos de osciloscopios partiendo de la labor científico-organizativa vinculada a reglas, normativas y experiencias obtenidas por personal calificado que ha dado solución a diferentes problemas relacionados estos equipos permitiendo así que personas con conocimientos básicos pero inexpertas puedan consultar un programa sencillo, didáctico y con una interfase amistosa que facilite el acceso al criterio experto de dichos especialistas agilizando la solución de las fallas.

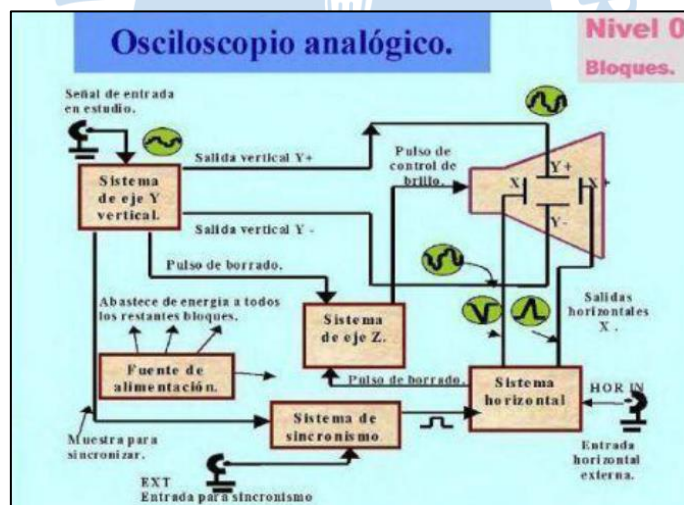


Figura 25. Diagrama básico de bloques de un osciloscopio de rayos catódicos.

Fuente: (Carballea, Gonzales, & Lezcano)

El diagrama de la Figura 25 representa el diagrama de bloques básico de un osciloscopio y es el modelo esencial que el experto humano representa en su mente al iniciar un proceso de reparación. El conocimiento de este diagrama y la relación que existe entre sus bloques permite que el especialista realice la reparación de forma metódica sabiendo la complejidad de los circuitos que se oculta detrás de cada bloque.

Asimismo, una vez definido y reconocido el diagrama de bloques esencial es necesario la capacidad de análisis con la finalidad de identificar el sub-bloque que causa el problema en el diagrama de detección de fallas que se muestra a continuación (Carballea, Gonzales, & Lezcano).

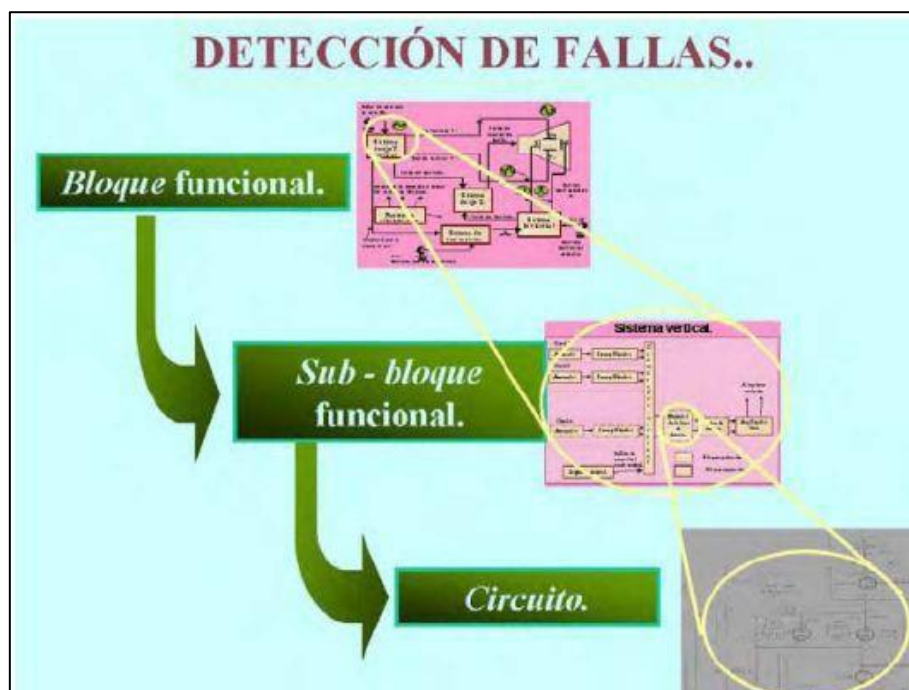


Figura 26. Nivel de análisis durante la reparación de un osciloscopio.

Fuente: (Carballea, Gonzales, & Lezcano)

En la Fig.25 se puede observar el diagrama de bloques a seguir para la detección de fallas y que corresponde al nivel de análisis del usuario. El resultado de esto es el aislamiento de un circuito factible de analizar los conocimientos convencionales de electrónica.

Definición de base de conocimiento.

Para la definición de la base de conocimiento fue desarrollado el lenguaje experto Wucshell permitiendo escribir dicha base mediante reglas de producción de la forma IF. THEN.ACTION calculando la incertidumbre de las conclusiones partiendo del grado de confianza que tengan los datos manipulados.

El fichero de reglas de Wucshell contempla tres módulos:

Definición de variables externas: se definen los datos que la base de conocimiento debe buscar en una zona de memoria externa.

Bloque de preguntas: se obtienen las variables que se preguntarán pudiendo definir opcionalmente las distintas soluciones además de especificar elementos que serán presentados como explicación a la pregunta.

Bloque de reglas: se sitúa el conjunto de reglas de producción ejecutándose acciones predeterminadas según las reglas que se cumplan (Carballea, Gonzales, & Lezcano).

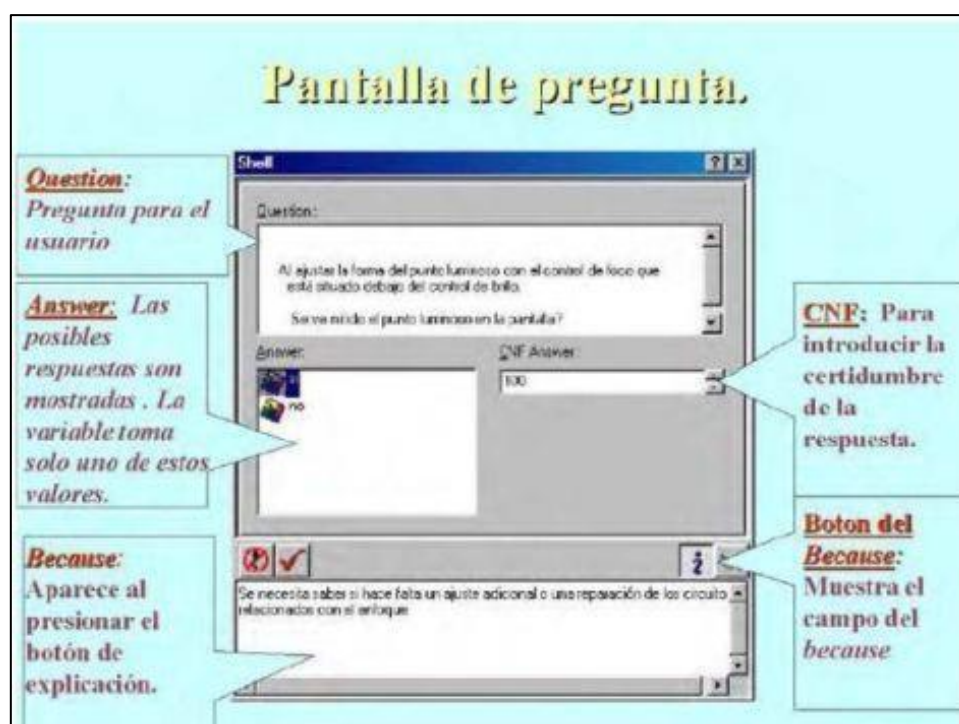


Figura 27. Módulos del lenguaje Wucshell.

Fuente: (Carballea, Gonzales, & Lezcano)

El Sistema Experto está constituido por el intérprete Wucshell combinando conocimientos privados que poseen los especialistas y conocimientos públicos presentes en manuales, libros o sitios web. Al consultar el Sistema Experto se esperan tres situaciones posibles:

- Se encuentra la causa de la falla.
- No se encuentra la causa de la falla y se informa al usuario que no es posible dar solución dado que no está en la base de conocimiento.
- No se encuentra nada por tanto no hay evidencia de problemas conocidos.

Cuando la falla es desconocida se aplica un método escalonado con tres niveles, el primero de ellos es el nivel de identificación y consiste en determinar que bloque produce la falla, el segundo es el nivel de análisis donde se procede a identificar el sub-bloque funcional con problemas y el tercer nivel consiste en la detección de la falla.

4.3. Un sistema experto de diagnóstico de fallas basado en parámetros de aeronaves

Actualmente el modo de mantenimiento periódico y los controles de rutina son considerados como los estilos de mantenimiento dominantes de las aviaciones nacionales. Sin embargo, el problema que presentan estos modos es el requerimiento de una gran cantidad de profesionales experimentados lo que resulta en pérdida de mano de obra y recursos.

El trabajo desarrollado en este artículo toma para su desarrollo los datos de vuelo de un cierto tipo de aeronave como la principal fuente de datos. De este modo, se propone un Sistema Experto en razonamiento de diagnóstico de fallas basado en el modo de falla a través de la extracción de información de síntomas de falla y el modo de falla del sistema.

El Sistema Experto mencionado se desarrolló con estructura MFC utilizando MySQL como base datos en una plataforma de Windows 7. Este se aplicó con éxito a un cierto tipo de aeronave nacional el cual adopta el análisis del árbol de fallas (FTA) para la detección de averías de la aeronave, reducción de la dificultad de razonamiento de diagnóstico y adquisición de conocimiento. (Qi Yao, 2015)

4.3.1. Proceso de diagnóstico de fallas

- Obtener síntomas de fallas: El síntoma de falla es la base principal del diagnóstico y deducción al igual que la capa inferior del conocimiento experto. El Sistema Experto utiliza una red neuronal de retro propagación para entrenar al sistema suficientemente con datos de muestra para obtener un mapa de entrada y salida. Los síntomas de fallas se obtienen del modelo el cual se almacena en el repositorio de diagnóstico de fallas del Sistema Experto. (Ronglin Lang, 2013)
- Análisis de árbol de fallas: Después de obtener los síntomas de fallas se tiene que establecer una relación directa entre los síntomas de falla individual. Es por ello, se utiliza el método de análisis de árbol de fallas el cual permite transformar el conocimiento almacenado en el repositorio de diagnóstico de fallas del Sistema Experto en un árbol de fallas.
- El propósito de establecer el árbol de fallas es que a partir de un análisis cualitativo se pueden encontrar todos los eventos principales que pueden conducir a un modo de falla. Sin embargo, la causa de falla se tiene que encontrar de manera rápida y eficiente, por ende, se requiere de un análisis de árbol de fallas cuantitativo el cual consiste en obtener el efecto de un conjunto de cortes mínimos a los mejores eventos
- Representación de reglas: Al integrar el árbol de fallas de conjuntos de cortes mínimos y reglas de representación del conocimiento, así como eventos finales en un conjunto de cortes mínimos y condiciones en las reglas, el proceso de resolución de problemas del Sistema Experto basado en el conocimiento de deducción se convierte en una deducción basada en conjuntos de cortes mínimos de árboles de fallas.

- Los nodos del árbol de fallas se representan como una colección de reglas, el nodo padre representa la conclusión y su hijo nodo representa la regla de la condición, donde cada nodo contiene datos utilizados para describir otras reglas. Es por ello, en la base de datos se utiliza un conjunto de nodos para identificar de forma única el árbol de fallas, donde cada nodo almacena su información para formar la base de reglas.
- Motor de inferencia: El razonamiento hacia adelante también conocido como la antigua cadena de razonamiento, es adecuado para los tipos de problemas de falla de aeronave ya el objetivo no es claro y se tiene un espacio de solución muy grande.
- Específicamente, el sistema puede encontrar automáticamente el evento superior coincidente y generar el evento superior del árbol de fallas de acuerdo con el sistema de falla ingresado. Este repite la operación de resolver el conjunto de cortes mínimos de acuerdo con el razonamiento directo y la importancia de los conjuntos de cortes mínimos hasta que la causa de la falla sea encontrada. (Jian Su, 2013).

4.3.2. Sistema de software de diseño

Hay varias formas de expresión de un Sistema Experto. Básicamente todos contienen el módulo de interacción humano-computadora, base de conocimientos, motor de inferencia e intérprete. En el presente Sistema Experto, los módulos se dividen en cinco partes, el módulo de gestión de usuarios, el módulo de diagnóstico de fallas y el módulo de salida. (Qi Yao, 2015)

- Módulo de interacción persona-computadora: La interfaz hombre-computadora está diseñada para realizar la transacción entre la función de entrada y salida. Los expertos en el campo pueden ingresar el conocimiento, actualizar y mejorar la base de conocimientos a través de él. Mientras que los usuarios generales pueden ingresar problemas y los datos a través de él.
- Módulo de gestión de bases de datos: La base de datos se utiliza para almacenar todo tipo de información de control relacionada con el proceso de razonamiento. Como algo esencial, el Sistema Experto almacena tabla de parámetros de vuelo, tabla de reglas, tabla de información de nodos de árbol de fallas y otra información de datos importantes de aeronaves con una base de datos de MySQL.

Cada una de las partes esenciales mencionadas del Sistema Experto almacenan información muy importante, como el estado del vuelo, el cual registra el estado de algunas partes vitales del vehículo, incluida su vida útil restante, la frecuencia de mantenimiento, etc. El módulo de base de datos está equipado con la operación “CRUD” comúnmente utilizada para mejorar la base de conocimientos gradualmente.

- Módulo de gestión de usuarios: Existen diferentes niveles de usuarios los cuales tienen diferentes privilegios de acceso. Los usuarios generales sólo pueden usar este software para el diagnóstico de fallas, mientras que los expertos además de usarlo para

diagnóstico de fallas pueden agregar, modificar e ingresar nuevos conocimientos a la base de datos de fallos para optimizar el modelo.

- Módulo de diagnóstico de fallas: El módulo de diagnóstico de fallas es el módulo principal del Sistema Experto, el cual permite a los usuarios generales localizar el problema de los aviones como si fueran una persona experta. Por otro lado, este permite además respaldar la base de conocimientos, incluida la eliminación y modificación del conocimiento, y mejorar la base de conocimientos continuamente
- Módulo de salida: El módulo de salida se utiliza para explicar el comportamiento o resultados del Sistema Experto hacia los usuarios. Es decir, el objetivo principal de este módulo es explicar el motivo de la conclusión otorgada, así como las otras posibles soluciones. Por otro lado, el módulo de salida también admite la salida de proceso de diagnóstico de fallas y resultados en diferentes formas como Excel, Microsoft Word.

4.4. Un sistema experto para el mantenimiento predictivo de excavadoras en minería a tajo abierto.

El Perú es uno de los primeros productores de metales a nivel mundial (como cobre, oro, plomo, zinc, entre otros).

Según la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE), el sector minero es el responsable del 10% del PBI en el Perú. Por lo que la minería refleja la estabilidad de las políticas económicas en el país (Agencia AFP, 2020).

En el 2018, la minería a tajo abierto se consolidó en el país gracias a las operaciones cupríferas de los proyectos de Antapaccay, Constancia, Toromocho, Las Bambas y Cerro Verde. Logrando el 95% de la producción de cobre y más del 40% de la extracción aurífera. Además, para ese mismo año Perú tenía varios proyectos en cartera, de los cuales 84% estaban concebidos para ser minas a tajo abierto (Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, 2019).

Según Jaime Gálvez, presente ministro de Energía y Minas, la inversión base dedicada a reponer reservas y al mantenimiento de los equipos este año es US\$ 2,000 millones. A esta inversión base se suman proyectos de cartera entre los cuales está la ampliación de Toromocho (Ministerio de Energía y Minas, 2020).

Dado que la inversión base es significativa, se pretende minimizar los costos de mantenimiento mediante un Sistema Experto para la Detección de Fallas y el Mantenimiento Predictivo (FDPM) de excavadoras de minas.

El presente artículo estudia el Sistema Experto para FDPM cuya finalidad es identificar, detectar y localizar las fallas mediante varias bases de datos de mantenimiento históricos, métodos de análisis estadístico de fallas, algoritmos genéticos (GA) y redes neuronales

artificiales, para reducir las limitaciones técnicas (como el motor, el sistema de transmisión, el sistema hidráulico, etc.) como se observa en la Figura 28 (Kumar, Srivastava, & R.K, 2012).

4.4.1. Componentes del sistema experto para FDPM

- Base de conocimiento: El conocimiento es adquirido generalmente de documentos, sistemas informáticos y de personas expertas en el tema.
- Base de reglas: El sistema FDPM representa una compilación de reglas destinadas a detectar, clasificar y localizar componentes fallados en el motor, el sistema hidráulico, sistema de transmisión, sistema de frenos, sistema eléctrico y de seguridad, etc.

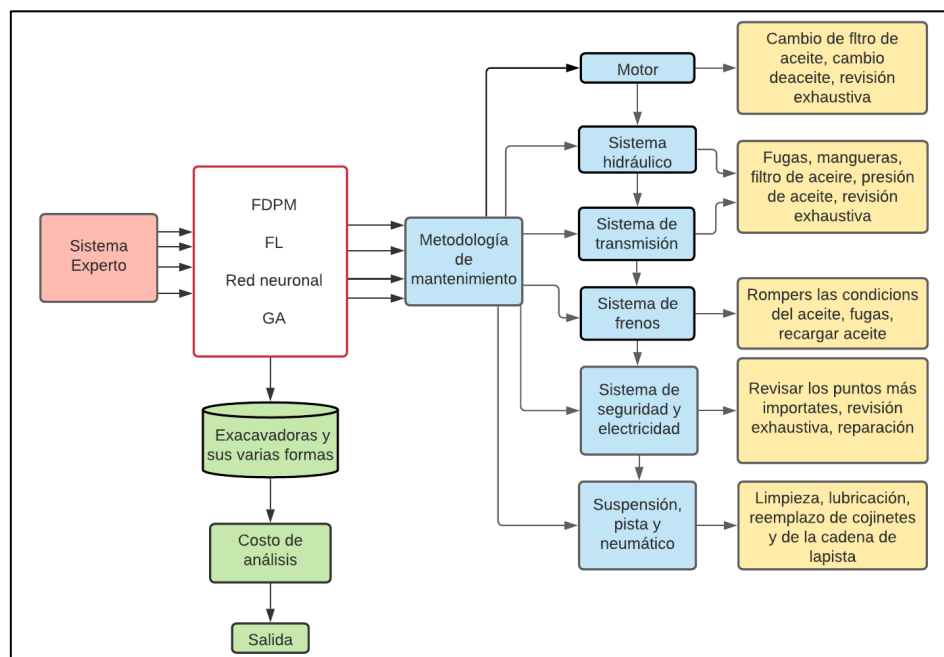


Figura 28. Sistema Experto para FDPM de excavadoras de minas.

Fuente: Adaptado de (Kumar, Srivastava, & R.K, 2012).

- Interfaz de Usuario: El usuario puede suministrar información mediante cuestionarios preparados sobre varios componentes y subcomponentes de excavadoras mineras sobre la predicción de fallas para luego tomar las acciones necesarias.
- Reglas de Producción: Se construyen usando el formato SI-ENTONCES que toma en cuenta seis parámetros.

Tabla 1. Parámetros de producción y sus pesos.

Parámetro	Peso
S: seguridad	1.5
IP: importancia de máquina	03
MC: costo de mantenimiento	02

FF: frecuencia de falla	1.5
DL: Duración del tiempo de inactividad	01
OC: Condiciones de operación	01

Fuente: (Kumar, Srivastava, & R.K, 2012).

Índice de criticidad (CI):

$$CI = \sum Parámetro_i * peso_i$$

Tabla 2. Estrategias de Mantenimiento aplicadas según el Índice de Criticidad.

Índice de Criticidad	Estrategias de Mantenimiento	Componentes de excavadoras de minas
> 395	Predictivo	Motor, sistema hidráulico y de transmisión
280-394	Predictivo	Sistema de freno y eléctrico
<280	Correctivo	Suspensión, pista y neumático

Fuente: (Kumar, Srivastava, & R.K, 2012).

- Bases de datos: Se generan bases de datos con respecto a la base de datos de excavadoras y sus diversas formas, capacidad de producción, especificación del equipo, tasa de producción, etc. En la base de datos se almacenan tres categorías de datos históricos. La primera categoría representa todos los datos de sistemas medidos durante las últimas 20 sesiones de monitoreo periódicas. Segunda categoría: para cada sesión de supervisión periódica en la que se detecta un componente en deterioro, se almacena en la base de datos. La tercera y última categoría representan todos los datos del sistema medidos durante cada sesión de monitoreo continuo en la que se detecta una falla en un componente (Kumar, Srivastava, & R.K, 2012).
- Modelo de red matemática o neuronal: Estos modelos se diseñan mediante ecuaciones o funciones aproximadas que modelan el proceso de envejecimiento o deterioro para cada tipo de componentes y también para el diagnóstico de fallas para cada tipo de componentes y subcomponentes.
- Diagnóstico de eventos y fallas: Compara los datos umbrales con los datos del evento, como la duración de la falla, la magnitud y la frecuencia de ocurrencia, estos datos se utilizan para localizar y clasificar la fuente de la falla. Una vez determinada la causa probable se estima el tiempo hasta la falla y recomienda acciones correctivas, de ser necesario.

- Módulo de salida: Con la ayuda del módulo de salida, los resultados se muestran en la pantalla y pueden imprimirse o guardarse en un archivo para mantenimiento futuro / predicción de fallas (Kumar, Srivastava, & R.K, 2012).

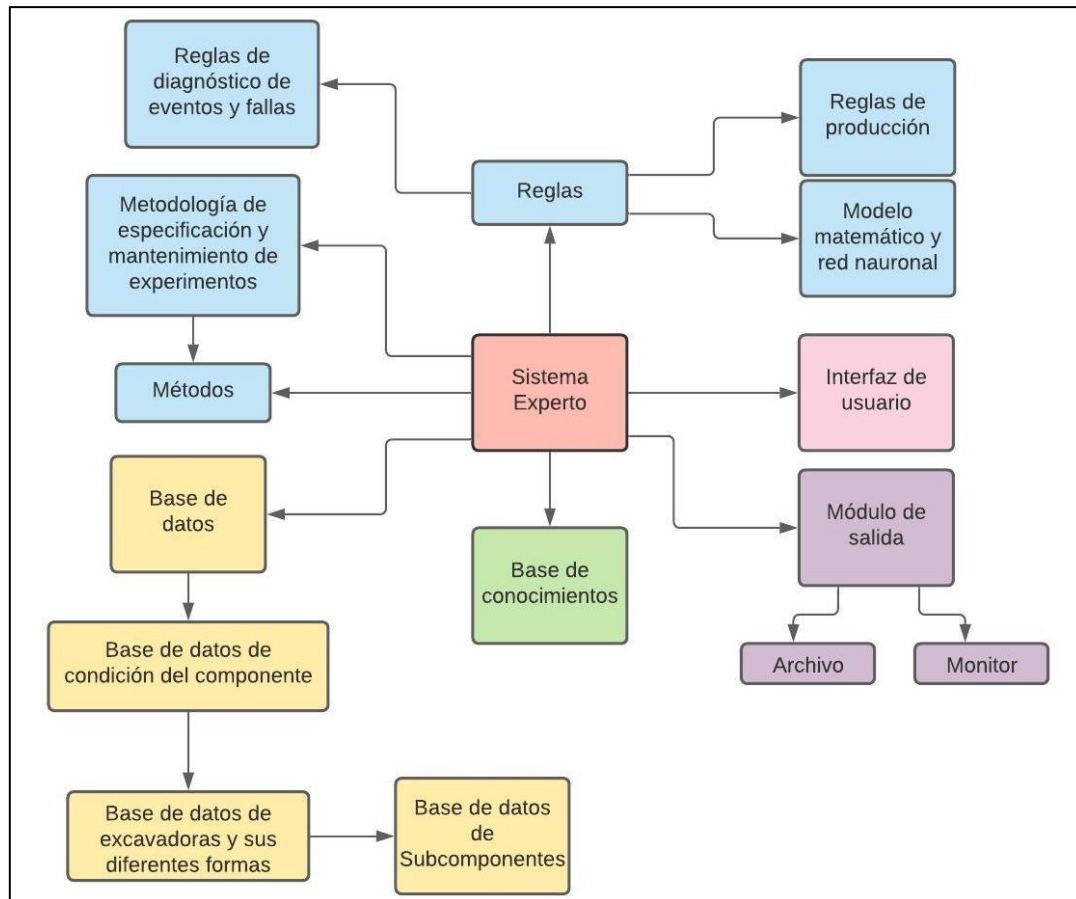


Figura 29. Componentes del Sistema Experto para FDPM.

Fuente: Adaptado de (Kumar, Srivastava, & R.K, 2012).

4.4.2. Resultados

Caso: Sistema hidráulico y de transmisión

Si hay fugas en el sistema de transmisión, caída de presión en la tubería, el valor no funciona, el valor se desliza, la lectura del barómetro es defectuosa.

Entonces el estado de la excavadora es deficiente.

Si no verifique el mantenimiento del valor, verifique la caída de presión, verifique el defecto del barómetro.

O, si el filtro de aceite está defectuoso, el tiempo de mantenimiento de rutina para el filtro de aceite ha terminado, **si** la viscosidad del aceite es baja, **si** hay partículas de polvo disponibles en el aceite.

Entonces, el sistema hidráulico y de transmisión necesita revisión / mantenimiento de rutina (Kumar, Srivastava, & R.K, 2012).



Conclusiones

- El desarrollo de los Sistemas Expertos es de gran importancia dada las prestaciones que ofrecen en la vida real ayudando de gran manera a la toma de decisiones basadas en la experiencia de un especialista frente a problemas que se presentan en un área en específico logrando convertir el conocimiento en un activo trascendente dentro de la organización y que se traduce en un valor importante para la misma.
- Los Sistemas Expertos son sistemas basados en algoritmos de computadoras desarrollados para dominar un conocimiento en particular, es decir, están desarrollados con la intención de ser capaces de realizar la tarea de tomar decisiones para resolver problemas complejos. Dicha tarea es considerada el nivel más alto de inteligencia, y el hecho de que un Sistema Experto sea capaz de realizarla lo convierte en una herramienta muy potente ya que genera una gran cantidad de ventajas tales como: rapidez incomparable con un ser humano, no sufre pérdidas de facultades con el paso del tiempo, puede trabajar en entornos o en condiciones extremas que un ser humano no podría, sirve de apoyo en toma de decisiones haciendo más eficiente la tarea, entre muchas otras más.
- El Mantenimiento Industrial es un conjunto de tareas destinadas a preservar y maximizar la vida útil de un activo a fin de reducir costos por reparación y evitar pérdidas económicas por paradas de producción. Asimismo, el Mantenimiento Industrial es una disciplina muy amplia y necesita apoyarse en el conocimiento de varios expertos dependiendo del área de trabajo; sin embargo, la tecnología está constantemente evolucionando por lo que se vuelve una necesidad que el mantenimiento se apoye en herramientas eficaces y capaces de tomar decisiones automáticamente. Es aquí donde los Sistemas Expertos juegan un rol importante, ya que pueden, a través de una base de conocimientos y datos, identificar una falla a tiempo y tomar decisiones de cómo proceder al experto.
- Los sistemas expertos son herramientas necesarias tanto en el campo laboral, como pueden ser sistemas expertos enfocados a industrias o máquinas, así como en la vida cotidiana, como pueden ser sistemas expertos enfocados al mantenimiento de equipos del hogar. Esto gracias a que los sistemas expertos nos guían y corrigen al momento de realizar alguna actividad en la que el sistema experto fue diseñado, indicándonos si lo que hacemos es correcto o está mal. Un sistema experto nos orienta de tal forma como lo haría un profesional o experto.



Referencias bibliográficas

- ¿Qué es RCM? (2016). Obtenido de Mantenimiento Petroquímica: <http://www.mantenimientopetroquimica.com/rcm.html>
- Agencia AFP. (20 de Agosto de 2020). Minería puede ser el salvavidas para economía peruana en recesión. *Diario Gestión*.
- Alonso, M. (1992). *Conocimiento y Base de Datos: Una propuesta de Integración Inteligente*. Tesis doctoral, Cantabria.
- Badaró, S., Ibanez, L., & Martín, A. (2013). *Sistemas Expertos: Fundamentos, Metodologías y Aplicaciones*. Universidad de Palermo, Buenos Aires.
- Carballea, R., Gonzales, E., & Lezcano, M. (s.f.). *SEMIM. Un Sistema Experto de ayuda al Mantenimiento de Osciloscopios Analógicos*. Santa Clara.
- Carrillo, J. (1987). *Metodología para el desarrollo de sistemas expertos*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/39425509>
- Espinosa, F. (s.f.). *Confiabilidad Operacional de Equipos: Metodología y Herramientas*. Universidad de Talca, Talca.
- García, O. (2007). *El Sistema PMO: Optimización Real del Mantenimiento Planeado*. Santiago de Chile.
- Gómez de León, F. (1998). *Tecnología del Mantenimiento Industrial*. Murcia: Servicio de Publicaciones, Universidad de Murcia.
- Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. (Enero de 2019). *Minería a Tajo Abierto en Perú se consolida con puesta en marcha de última operaciones*. Obtenido de Minería: <http://www.mineriaonline.com.pe/actualidad/mineria-a-tajo-abierto-en-peru-se-consolida-con-puesta-en-marcha-de-ultimas-operaciones#:~:text=La%20miner%C3%ADa%20a%20tajo%20abierto,se%20accede%20al%20material%20C3%BAtil>.
- Jian Su, Y. C. (2013). Design of a Fault Diagnosis Expert System of Fire Control System Based on Fault Tree Analysis[J]. *Computer Measurement & Control*.

- Kumar, Srivastava, & R.K. (2012). *An Expert System for Predictive Maintenance of Mining Excavators and its Various Forms in Open Cast Mining*.
- Leon, T. (2007). *Sistemas expertos y sus aplicaciones*. Pachuca de Soto. Obtenido de <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/183/Sistemas%20expertos%20y%20sus%20aplicaciones.pdf?sequence=1>
- León, T. (2007). *Sistemas Expertos y sus aplicaciones*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ciudad de México.
- Ministerio de Energía y Minas. (23 de Noviembre de 2020). *Inversión minera alcanzará los US\$ 4,200 millones este año*. Obtenido de gob.pe: <https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/315666-inversion-minera-alcanzara-los-us-4-200-millones-este-ano>
- Olarte, W., Botero, M., & Benhur, C. (2010). Importancia del Mantenimiento Industrial dentro de los Procesos de Producción. *Scientia et Technica*, 354-356.
- Oxford University Press. (2020). Obtenido de Oxford Reference: <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803095847145>
- Ponce, A. (2018). *Optimización del Mantenimiento Planeado en una Líneas de Producción de Bebidas Carbonatadas*. Tesis de pregrado, Universidad de Piura, Departamento de Ingeniería Mcánico-Eléctrica, Piura.
- Qi Yao, J. W. (2015). A Fault Diagnosis Expert System Based On Aircrafts Parameters.
- Quintanar, T. L. (2007). *SISTEMAS EXPERTOS Y SUS APLICACIONES*. Hidalgo: PACHUCA DE SOTO,HGO.
- Ronglin Lang, L. P. (2013). Fault Diagnosis Expert System Based on Flight Data for Civil Aviation.
- Sejzer, R. (6 de Julio de 2016). Obtenido de Calidad Total: <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2020/06/cuales-son-los-pilares-del-mantenimiento-productivo-total/>
- Soto, M. C. (2007). *Sistema experto de diagnostico medico del Síndrome de Guilliam Barré*. Perú: Oficina General del Sistema de Bicliotecas y Biblioteca central de la UNMSM.
- Trocel, D. (s.f.). Obtenido de Predictiva21: <https://predictiva21.com/mantenimiento-proactivo-cuidados-esenciales/>
- Universidad ESAN. (25 de Junio de 2020). Obtenido de Conexión ESAN: <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2020/06/cuales-son-los-pilares-del-mantenimiento-productivo-total/>
- Vilchez, R. (2004). *Aplicación de los sistemas expertos en el sector pesquero*. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1686>

Villegas, D. E. (2008). *Diseño de un Sistema Experto en Mantenimiento e Implementación en un Sistema de Ingeniería*. Medellín.

