

# Sistema experto asistente para atender las fallas mecánicas en un sistema de transporte por cable aéreo.

Tabares Ospina Hector  
Profesor

I.U. Pascual Bravo  
Medellín-Colombia  
57 3168601736

h.tabares@pscualbravo.edu.co

González Rojo Alexander  
Operador de Mantenimiento

Metro de Medellín, Ltda.  
Medellín-Colombia  
57 3122356075

rojo535@yahoo.es

## RESUMEN

La determinación de la solución de fallas operativas mecánicas en un sistema de transporte por cable aéreo requiere un rápido tratamiento, si lo que se pretende es no afectar su operación en la movilidad y conectividad urbana y cumplimiento del servicio. Estas fallas no generan alarmas ni se visualizan en los módulos de control por cuanto no existen sensores de bajo costo para su detección, por lo que su localización hace parte de las labores de inspección diarias que hace el personal operativo y de mantenimiento.

Se presenta en este artículo la implementación de un sistema experto que actúa como asistente del operador de cable para atender las fallas operativas mecánicas en un sistema de transporte por cable y facilitar la toma de decisiones conducentes a resolver la ocurrencia. El sistema propuesto modela el conocimiento específico del personal de mantenimiento de cable aéreo, mediante relaciones entre las variables evidenciables y objetivo.

En las especificaciones de diseño del aplicativo desarrollado, la base de reglas y el motor de inferencia se implementaron en lenguaje C# de Microsoft, y la base de conocimiento reside en un manejador de bases de datos.

Se espera que el sistema informático desarrollado agilice el tiempo de atención de la falla.

## ABSTRACT

The determination of mechanical operational failures in aerial cable-car transport systems requires a swift response, especially if the intended result is not to adversely affect the operational mobility and connectivity in urban areas that depend on the reliability of the service. These failures do not generate alarms nor are they displayed in the control modules because there are no low-cost sensors for detection. As a result, their detection is part of the daily inspection tasks that maintenance workers perform.

This paper will present the implementation of an expert system that acts as an assistant to the maintenance operator. Its purpose is to assist in determining the mechanical operational failures in aerial cable-car systems and facilitate the decision-making process in resolving the issue. The proposed system is based on the same knowledge that a cable-car maintenance worker possesses, derived from the relationships among the objective and visible variables.

In the design specifications of the developed application, the fundamental rules and inference engine are carried out using Microsoft C# language. The knowledge base is housed in a database drive.

It is expected that the developed information system will expedite the time necessary to service the failure.

## Palabras clave

Sistema experto, fallas operativas mecánicas, sistema de transporte por cable aéreo.

## Keywords

Expert system, mechanical operational failures, aerial transport cable-car system.

## INTRODUCCION

El objetivo fundamental de este trabajo consiste en desarrollar un sistema experto (SE) que actúa como asistente del personal de mantenimiento, para atender las fallas operativas mecánicas en un sistema de transporte por cable aéreo, caso en particular, el Metrocable de la ciudad de Medellín. Este trabajo es un subproducto del proyecto de investigación "Nuevas funcionalidades de un PLC para hacer gestión activa de cargas", realizado en la INSTITUCION UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO (IUPB), Medellín, Colombia.

El artículo comienza tratando el sistema de transporte por telecabinas, Metrocable, continúa con el estado de la técnica relacionado con los procedimientos para atender las fallas operativas mecánicas en el Metrocable y el estado del arte sobre el asunto. A continuación se presenta la metodología utilizada para la implementación de un sistema experto determinista que asesore la solución de una falla mecánica. Continúa el artículo mostrando las pruebas de validación y los resultados más importantes. Finaliza, presentando las principales conclusiones del trabajo investigativo.

## *Sistema de transporte por telecabinas*

Un detallado estudio sobre los sistemas de transporte por telecabinas está más allá del ámbito de esta unidad. En [1, 2], se ofrece una completa información con referencias específicas. Se presenta a continuación un resumen sobre los principales aspectos relacionados con el tema.

Se indica en [3], que los sistemas de transporte por telecabinas han utilizado principalmente en las zonas turísticas. Sin embargo, en los últimos años, estos sistemas también se han empezado a utilizar en áreas urbanas densamente pobladas.

El sistema de transporte por telecabinas de la ciudad de Medellín, denominado Metrocable, está concebido como el primer sistema por cable aéreo en el mundo, conectado a un sistema de transporte masivo tipo Metro y se presenta como una opción limpia y sostenible de desarrollo.

El Metrocable cuenta con 4 estaciones y 90 telecabinas desenganchables con capacidad para ocho pasajeros, y un tiempo de recorrido de 19 minutos para la vuelta completa de 2.072 metros. La estación motriz esta ubicada en la estación Acevedo del sistema Metro donde se encuentra el garaje, el puesto de mando del cable y la infraestructura de tracción eléctrica y de socorro. La estación Santo Domingo Savio, ubicada al final del trayecto del cable, es la destinada para el regreso de las cabinas, también llamada estación retorno. Las estaciones intermedias Andalucía y Popular están ubicadas entre la estación motriz y la estación retorno.

En total son 20 torres las que sostiene el cable por el que se desplazan las cabinas, a una velocidad promedio de 5 metros por segundo, lo que permite a los usuarios movilizarse desde la estación terminal de Santo Domingo Savio, hasta la estación Acevedo del Metro, en aproximadamente 8 minutos.

En caso de ausencia de energía el sistema se opera con un motor térmico (Diesel), el cual acciona motores hidráulicos que mueven la polea principal.

La sistema del Metrocable, (véase figura 1), opera alrededor de 19 horas por día, por consiguiente, los requisitos de mantenimiento del sistema son más altos que otros teleféricos, siendo necesario verificar las condiciones de operatividad, facilidad de mantenimiento y seguridad de los usuarios y el sistema en sí [5, 6].

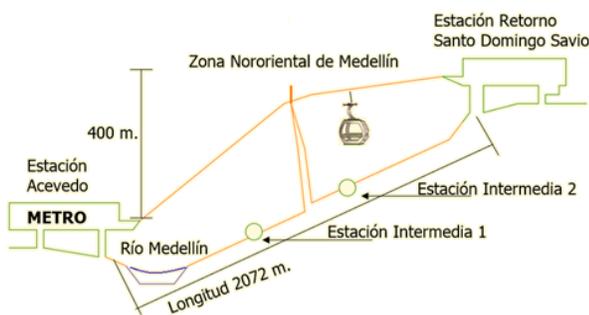


Figura 1. Estructura básica del Metrocable. Fuente: [4]

La operación del Metrocable es supervisada desde el Puesto Central de Control, por el Supervisor de Operaciones y controlada desde el Puesto de Mando del Cable, por el Operador del Cable, mediante los tableros de control y equipos de comunicación.

El sistema de transporte es similar en diseño y construcción a las utilizadas para el transporte de pasajeros en las zonas turísticas de invierno en Donovaly-Eslovaquia, Daemyung-Corea, La Clusaz-Francia.

Las características técnicas del sistema se describen a continuación. (Véase la tabla 1).

Tabla 1. Características técnicas.

Característica	Detalle
Tipo de sistema	Monocable desenganchable
Sistema de tensión	Motriz fija
Energía	Eléctrica
Potencia del motor	920 Kw
Consumo energía/día	6.072 kWh
Longitud del trazado	2070m.
Desnivel	398.68 m
Pendiente promedio de la línea	20%
Velocidad línea	Hasta 5m/s
Numero de pilonas	20
Altura máxima de piona	33m
Ancho vía	5.7m
Capacidad de usuario	3000 usuarios/hora
Número de estaciones	4
Número de cabinas	93
Pasajeros por cabina	8 sentados
Distancia entre cabinas	60m
Frecuencia	12 seg (a 5 m)
Ciclo de operación	Continuo, 18 horas al día, 360 días al año.
Horario de operación	De lunes a sábado desde las 4:15h hasta las 23:30h. Domingos y festivos desde las 9:00h hasta las 22:30 h.
Fabricante	Empresa Pomagalski (Francia)

### Estado de la técnica sobre fallos operativos mecánicos en el sistema Metrocable

En [1, 2, 4], se ofrece una completa información sobre el asunto. Un recuento sobre los principales aspectos relacionados con el tema, se presenta a continuación.

Independientemente del fabricante (austríacos, franceses o italianos), tipo, modelo y tamaño, los sistemas de transporte de cables aéreos son tecnologías concebidas como un conjunto de sistemas electromecánicos que deben ser supervisados y monitoreados desde diferentes equipos de control automático con el fin de garantizar la integración de cada uno de ellos y su correcto funcionamiento. Las averías o fallas del sistema están clasificadas en dos grandes grupos: averías operativas eléctricas y mecánicas. La primera, que genera alarmas en el sistema, esta relacionada con fallos o defectos detectados en el generador de impulsos, gálidos, CPU del PLC, motores, zonas de avance, pesaje de pinza, entre otras. Al respecto, el sistema cuenta con una pantalla "touch panel" que permite la visulación de las fallas. Dichos equipos están ubicados en todos los armarios de mando y control en todas las estaciones. Como lo relaciona el fabricante, las averías mecánicas tratan las fallas del sistema relacionadas con las llantas, correas, piñones, poleas, chumaceras, riel de circulación, y las partes

propias de la cabina como son las ruedas de circulación, el patín de arrastre, rozadores y defecto en puertas.

No existe herramienta o dispositivo que automáticamente detecte fallas en las anteriores partes mecánicas, por lo que su localización hace parte de las labores de inspección diarias sugeridas por el fabricante, que hacen los operarios de mantenimiento, razón por la cual, este trabajo investigativo se justifica en la medida en que se desarrolle una aplicación del tipo sistema experto, que actúe como asistente del Personal de Operativo y de Mantenimiento, para atender las referidas fallas mecánicas del sistema.

En todos los casos, para abordar e identificar los defectos generados durante la operación comercial del Sistema, se hace necesario un conocimiento previo del mismo, de los eventos y de cómo se deben atender por parte de los Operadores de Cable (OPC), Operadores de Estación (OES) y Personal de Mantenimiento (PM), tratando de afectar lo menos posible la operación, es decir, que los tiempos de parada sean mínimos. Esto se logra conociendo el funcionamiento y la manipulación de los equipos, los elementos que intervienen en éstos y la buena interpretación de los defectos presentados en la operación, de esta manera se le brinda comodidad y rapidez a los usuarios en el desplazamiento en las cabinas.

### *Antecedentes*

El sistema de transporte por telecabina de la ciudad de Medellín, Metrocable, es el primer sistema por cable aéreo en el mundo, conectado a un sistema de transporte masivo. Adicionalmente los requisitos de mantenimiento del sistema son más altos por cuanto no se trata de un teleférico de turismo sino de un sistema de transporte comercial que trabaja alrededor de 19 horas al día. Por otra parte, no existen dispositivos de bajo costo con los cuales se puedan detectar los indicadores de fallas de los sistemas mecánicos del Metrocable. Por consiguiente la literatura presenta pocos estudios relacionados con el asunto. En el mejor de los casos, se trata de investigaciones realizadas a nivel local, y validadas internacionalmente.

Con respecto al estado del arte y de la técnica, relacionadas con las fallas operativas mecánicas del sistema, se presenta a continuación un recuento. En [7], Quintero argumenta que los estudios sobre las tareas de mantenimiento de los sistemas de transporte por cable aéreo se han desarrollado en el campo de análisis dinámico, análisis de vibraciones, las simulaciones matemáticas, entre otros, pero todos ellos, básicamente centrado en temas de diseño más que los temas de mantenimiento. Las tareas de mantenimiento actuales en el sistema Metrocable se realizan siguiendo las instrucciones del fabricante, pero debido a la naturaleza de la operación del sistema, el PM ha desarrollado otras rutinas de mantenimiento complementarias asociadas a la nueva dinámica de la operación de teleféricos.

Quintero presenta una metodología para el diseño e implementación de un sistema experto SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), para el sistema de transporte masivo Metro de Medellín. En este caso, el objetivo del desarrollo de un sistema experto SCADA se basa en la necesidad de preservar el conocimiento adquirido por el personal de mantenimiento. Básicamente, el SCADA utiliza la información en tiempo real de los sensores situados en la pinza desenganchable de las telecabina, para el cumplimiento de los requisitos de operatividad, facilidad de mantenimiento y seguridad del Metrocable. El sistema experto propuesto por los autores es un sistema SCADA tradicional combinado con un sistema experto basado en los sistemas de inferencia difusos [8].

Con el sistema experto SCADA propuesto, los autores modelaron las reglas de mantenimiento establecidas por el fabricante y el conocimiento de los Operadores de Mantenimiento, para estimar el comportamiento del sistema en términos de Mantenimiento Basado en Condición (CBM).

Así mismo, en la Revista Metro [1, 2] se informa que el Metro de Medellín en conjunto con la Universidad EAFIT y Colciencias, formalizó un convenio de investigación para desarrollar un sistema de diagnóstico para el sistema pinza-cable del Metrocable, que permitirá conocer el comportamiento dinámico de todas las variables del sistema, tales como alineación horizontal y vertical de las rampas de ingreso a las estaciones, alineación horizontal y vertical del cable portador-tractor, la velocidad de ingreso y salida de los vehículos en las estaciones, el comportamiento en la máxima y mínima apertura de la pinza, entre otras. Todo lo anterior con el fin de evaluar aspectos de seguridad, vida útil, condiciones de comodidad y estabilidad, y buscar así mejorar los tiempos de disponibilidad del sistema.

Otra investigación que adelanta el Metro de Medellín con la Universidad Eafit es la que tiene que ver con la dinámica de los cables aéreos. El convenio, que inició a mediados del 2011, tiene como objetivo identificar medidas de mantenimiento y de control adicionales a las que ya existen en el manual de cables de la Empresa, con el fin de garantizar el excelente funcionamiento de los cables existentes.

A la vez, el Área Operación de Cables Aéreos del Metrocable, consciente de la necesidad de garantizar que las intervenciones realizadas durante cada una de las rutinas de mantenimiento en los equipos y elementos de control se ejecuten de manera confiable y óptima, implementó un simulador de pruebas eléctricas y de manejo del "Touch Panel", que permite la verificación del estado de los componentes de los equipos electrónicos y de control sin intervención durante la operación del cable.

En [9] los investigadores diseñaron un sistema de inferencia difuso que incorpora los procedimientos de mantenimiento establecidos por el fabricante y por los operadores de mantenimiento que, con sus años de experiencia, han establecido otras rutinas, propias de las condiciones en las que opera el sistema Metrocable, y el concepto de Mantenimiento Basado en Condición (CBM) para modelar los modos de fallo del sistema Metrocable. Como se indica en [10], el Mantenimiento Basado en Condición (CBM) es una metodología o técnica de mantenimiento, también conocida como "Mantenimiento Predictivo", que se realiza con base en las condiciones o parámetros de los equipos, en los que se establecen algunos límites o ventanas operacionales y se verifica su comportamiento, mediante algunas tecnologías como: Análisis de Vibraciones, Termografía Infrarroja, Coronografía Ultravioleta, Alineación y Balanceo Dinámico.

En [11], los investigadores informan que los sistemas de transporte por telecabinas utilizan elementos estandarizados de producción, que no tienen en cuenta ciertas condiciones de las operaciones concretas (el diseño no discrimina entre un medio de transporte para los pasajeros de turismo y otros medios de transporte urbano con un funcionamiento continuo). Sin embargo, las telecabinas comerciales son sensibles a las siguientes condiciones externas: (i) cargas y frecuencia de operación; (ii) las condiciones ambientales - vientos, temperatura, la humedad, corrosión, etc.; y (iii) la disponibilidad del sistema. Por esa razón, los investigadores evalúan el efecto de las condiciones comerciales de funcionamiento de las telecabinas, basado en mediciones obtenidas a partir de una disposición de sensores que registran el comportamiento conjunto

de acoplamiento entre la cabina, las pinzas desengalchables y los cables de sujeción y tracción.

Finalmente se informa que el PM del Metrocable integran grupos de investigación de la INSTITUCION UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO, y han venido trabajando modelos computacionales usando SE como el expuesto en [12]. Para los propósitos de este trabajo investigativo, el artículo antes referido fue tomado y adaptado para la atención de fallas operativas mecánicas del Metrocable.

## METODOLOGÍA Y PROCESOS DE DESARROLLO

Las fallas operativas mecánicas del sistema Metrocable, las tareas de mantenimiento que se realizan en el sistema siguiendo las instrucciones del fabricante, y la experiencia adquirida por el personal de mantenimiento desarrollando nuevas rutinas de vigilancia, llevó a pensar en el desarrollo de un sistema experto del tipo determinista, titulado SE\_FOMCA\_IUPB (Sistema Experto, Fallas Operativas Mecánicas, Cable Aéreo), para modelar el conocimiento del PM, para que actúe como su asistente en las labores de mantenimiento preventivo y correctivo.

Los actores que intervienen en el aplicativo SE\_FOMCA\_IUPB son: el ingeniero de sistemas que en este caso hace las veces de ingeniero del conocimiento (IC), el experto en el dominio de conocimiento sobre fallas operativas mecánicas en un sistema de transporte por cable aéreo (EDC) y los usuarios finales (UF) que interactúan con el sistema con miras de atender la falla que presenta el sistema.

La metodología abordada para la implementación del SE contempló las siguientes etapas:

Identificación del problema. En este caso, atender las fallas operativas mecánicas en un sistema de transporte por cable aéreo.

Selección de la variable objetivo y sus valores. El EDC definió como variable objetivo la atención de las soluciones de las fallas operativas mecánicas del sistema de transporte por cable aéreo, (véase tabla 2), sujetas a revisión periódica con el propósito de detectar sus modos de fallo.

La selección de las variables evidenciales y sus posibles valores. Sobre la base de conocimiento del EDC, se seleccionaron el conjunto de variables evidenciales relevantes. Cada parte mecánica del sistema de cable aéreo (véase tabla 2, llantas, correas, poleas, etc.) debe ser evaluado por distintos indicadores. Para el caso de las llantas, son: presión de aire, desgaste, tracción cabina. Todas las variables son de tipo booleano, asumiendo el valor de uno con el que se confirma el evento. El valor de cero, cuando no se presenta falla. Los indicadores listados no constituyen la universalidad de casos, por lo que el programa SE\_FOMCA\_IUPB provee los medios para la recolección de nuevos indicadores.

Diseño de las preguntas. El desarrollo del cuestionario es la parte más complicada y en general es una actividad iterativa. El proceso se puede comenzar identificando los indicadores de fallas, representadas en las variables evidenciales, presentes o no en los valores que asume la variable objetivo, estado de las partes mecánicas, identificada para el dominio del problema. En esta fase intervinieron el IC y el EDC. La adquisición de la información relevante se obtuvo consultando con el EDC y el IC extrajeron los principales indicadores de los diferentes tipos de fallas operativas

mecánicas. Estos modos de falla provienen de la relación de los indicadores descritos por el fabricante y monitorizadas por el personal de mantenimiento y los diferentes defectos que pueden ocurrir en cada elemento. Con base a los rasgos identificados en el paso anterior, el IC y el EDC diseñan las reglas a evaluar y las preguntas a formular a los UF del sistema cuando interactúa con el subsistema de interfaz de usuario final. Véase en la tabla 2, las reglas a evaluar y las preguntas a formular al UF.

Tabla 2. Variables evidenciales o de entrada.

Parte mecánica	Regla	Consecuente
Llantas	Falla presión de aire + Desgaste llanta + No Tracciona cabina.	Cambio de llantas
Correas	Desgaste Correas + Mal Estado Correas	Cambio correas
Correas	Falla tensión de Correas	Tensionar correa
Poleas	No Tracciona el eje de la polea	Cambio polea
Poleas	Desalineación + Desbalanceo de la polea	Se alinea polea
Chumacera	Falla Plato de sujeción de la chumacera	Cambio de plato
Chumacera	Falla Cuerpo de la Chumacera	Cambio de la chumacera
Chumacera	Falla Rodamiento de chumacera	Cambio de rodamientos de chumacera
Piñon	Fractura piñon + Desgaste piñon + Mal Estado piñon	Cambio de piñones
Riel de circulación	No Limpieza de riel de circulación	Limpiar la zona del riel afectado.
Cabina - Ruedas de circulación	Falla Rodamiento Cabina + Rueda Incompleta + Presencia de material	Cambio ruedas de circulación de la cabina
Cabina - Patin de arrastre	Patin desgatasdo + ausencia del patin de arrastre + ausencia de tornillos de sujeción	Cambio de patin

Se trata de una base de reglas especificada por el fabricante y nuevas rutinas desarrolladas por el PM, sobre las fallas operativas mecánicas del sistema. El SE intercambia datos entre las columnas tablas 2 para inferir el tipo de atención de la falla que está siendo reportada.

La tabla 2 no presenta una clasificación completa de las fallas operativas mecánicas, sino que existen tantas clasificaciones como expertos en el tema, siendo todas válidas y muchas veces complementarias unas de otras. De lo anterior se deduce que la base de conocimiento (BC) del programa SE\_FOMCA\_IUPB permite registrar nuevos tipos de fallas.

Implementación software. En las especificaciones de diseño del aplicativo SE\_FOMCA\_IUPB, se manejaron tres capas: interfaz, lógica de programa, datos; esto para lograr que la interfaz sea completamente independiente del sistema y la BC pueda alterarse sin tener que hacer cambios en la programación. La BC reside en un manejador de bases de datos. La base de reglas y el motor de

inferencia (MI) se implementaron en lenguaje C# para ambiente de escritorio, utilizando el escenario de conectado para tener acceso al motor de la BD.

La arquitectura básica del aplicativo SE\_FOMCA\_IUPB se presenta a continuación (Véase la Figura. 2).

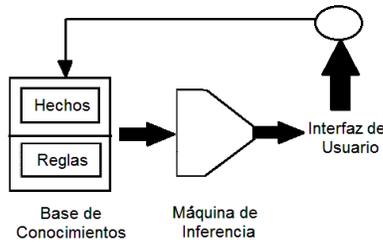


Figura 2. Arquitectura del aplicativo SE\_FOMCA\_IUPB.

El programa SE\_FOMCA\_IUPB está compuesto por tres subsistemas: i) el editor de variables evidenciales y objetivos, ii) la base de conocimiento, iii) la interfaz de usuario final.

### Editor de variables evidenciales y objetivos

Con base en los rasgos identificados en las variables evidenciales, el IC y el EDC las registran en el sistema SE\_FOMCA\_IUPB utilizando el subsistema editor de variables evidenciales (antecedentes) y objetivos (consecuente).

### Editor base de conocimiento

El archivo de las variables evidenciales y objetivos se carga en el subsistema de adquisición del conocimiento. Inicialmente el sistema no contiene posibles reglas. El EDC carga las variables generadas por el IC y configura las reglas en la base de conocimiento. Este proceso se repite hasta que se hayan configurado todas las soluciones posibles para cada una de las preguntas formuladas.

Es frecuente que diferentes fallas operativas mecánicas estén correlacionados, siendo necesario realizar cierta pregunta si la respuesta seleccionada a la pregunta anterior lo requiere. El subsistema permite establecer dependencias usando variables auxiliares internas.

Finalizado este proceso, las preguntas formuladas, las dependencias y la importancia asignada son guardadas en una base de datos.

### Bases de datos.

Todo el sistema esta relacionado como una base de datos Access (MDB) titulada SE\_FOMCA\_IUPB.db, y centra su gestión en dos aspectos principales: las partes mecanicas del sistema (Llantas, poleas, correas,..., etc.) y los indicadores de fallas provenientes de las partes mecánicas del sistema (Falla presión de aire, Desgaste llanta, No Tracciona cabina,..., etc.). El esquema de la base de datos relacional que cumple con el planteamiento de los requisitos se presenta en la Figura 3. El significado de las tablas y sus relaciones es el siguiente:

- Tabla\_ParteMecanica almacena la lista de las partes mecánicas que constituyen el sistema.

- Tabla\_Indicadores, contiene los indicadores de fallas de cada parte mecanica.
- Tabla\_AdquisicionConocimiento, comprende el listado de reglas que evalúa el SE.

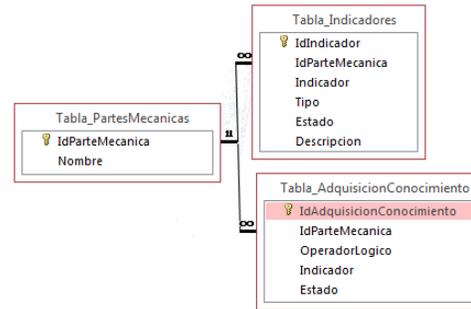


Figura 3. Diagrama entidad-relación de la BC del SE.

El significado de los atributos que componen las diferentes tablas es explícito, de tal manera que los lazos entre las relaciones son fáciles de entender. Por ejemplo, el lazo que conecta Tabla\_ParteMecanica con Tabla\_Indicadores, clasifica los indicadores de fallas del sistema.

### Interfaz de usuario final.

El subsistema de interacción con el UF, permite el acceso al conocimiento especializado, que puede consultarse interactivamente en cada paso, luego de seleccionar la variable evidencial y su valor en el recorrido desde el inicio a la meta.

El cuestionario primero se presenta al EDC cuando utiliza el subsistema de adquisición del conocimiento para completar la BC y verificar como están relacionadas cada una de las opciones disponibles para recomendar una solución.

El funcionamiento general del subsistema de interacción con el UF es el siguiente: el UF selecciona la parte mecánica y responde las preguntas planteadas por el SE relacionadas con el conjunto de variables evidenciables o indicadores relevantes asociadas.

La consulta transcurre en general según el esquema siguiente: Primero se plantea al usuario la pregunta relacionada con cada parte mecánica que constituye el sistema para alcanzar una determinación aproximada del contexto. El dialogo, por parte del sistema, esta a menudo dimensionado para ir confirmando o rechazando hipótesis sobre los indicadores, o para realizar una aproximación sucesiva hacia un objetivo introducido de antemano (por ejemplo, atención según tipo de falla).

La configuración realizada por el UF es empleada por el MI para obtener razonamiento deductivo automático, seleccionando las reglas posibles que especifican la atención al tipo de fallas mecanicas presentes en el sistema.

## RESULTADOS

Para probar el sistema, se empleo el subsistema de interfaz de interacción con el UF. Con los datos definidos en los filtros, el sistema SE\_FOMCA\_IUPB simula al experto humano, usando el MI, aplicando un encadenamiento de reglas hacia adelante para contrastar los hechos particulares de la base de hechos con el conocimiento contenido en la BC y obtener conclusiones acerca de la consulta realizada. En la Tabla 3, se presenta la inferencia del SE ante cualquier posible falla reportada por los respectivos indicadores.

Tabla 3. Validación del sistema.

Sistema Experto			
Variable de entrada: Indicadores de fallas (antecedentes)			Variables de salida (consecuente)
Falla presión de aire x	Desgaste llanta	No Tracciona cabina.	FOM. Cambio de Llantas.
Falla tensión x	Desgaste Correas	Mal estado correasa.	FOM. Cambio de correas
Desalineación	Desbalanceo	No Tracciona el eje.	NO HAY FOM.
Falla plato sujeción	Falla cuerpo Ch.	Falla rodamiento Ch.	NO HAY FOM.
Fractura Piñon	Desgaste Piñon	Mal estado piñon	FOM. Cambio de piñones
Falla Rodamiento-cab. x	Fractura rueda.	Presencia de mat.	FOM. Cambio de rodamientos

Como se observa, el SE determina exitosamente la solución del tipo de atención de la falla en función de las variables evidenciales seleccionadas.

Para lograr un mejor rendimiento del MI del sistema informático, SE\_FOMCA\_IUPB maneja la transaccionalidad de la base de datos y su procesamiento de manera local, usando los recursos de la máquina en vez del servidor designado.

## CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo consistió en desarrollar el prototipo software SE\_FOMCA\_IUPB para la determinación de fallas operativas mecánicas en el sistema de transporte por cable aéreo.

El sistema propuesto modela datos históricos relacionados con las fallas operativas mecánicas, el conocimiento específico del fabricante o del personal de mantenimiento experto en el asunto, mediante relaciones entre conceptos explicitados en las variables evidenciables (indicadores de fallas), y las variables objetivos (solución de las fallas).

El prototipo de SE permite obtener información sobre el tipo de fallas operativas mecánicas de acuerdo a los indicadores de desempeño.

Las operaciones de mantenimiento mecánico del sistema son registradas por los operarios en el SE, posibilitando que el sistema emita futuras recomendaciones sobre la realización de labores de mantenimiento de las piezas mecánicas del sistema, en función de los tiempos promedios calculados por el sistema, en el que cada elemento mecanico falló.

Las características del sistema experto SE\_FOMCA\_IUPB se presentaron y los indicadores de fallas se desarrollaron con la normativa ISO 13374-2: 2007 (E) [13] en el que se especifican los requisitos para la arquitectura de procesamiento en CMD (Condition Monitoring Diagnóstico).

El prototipo de sistema desarrollado está accesible en la dirección: <http://www.pascualbravo.edu.co/desarrollosinvestigacion/>. Se encuentra también un video tutorial que enseña como utilizar el software.

## AGRADECIMIENTOS

Esta sección reconoce la ayuda de los señores profesores Oscar Botero, Julian Galeano, docentes titular de las asignaturas en Control Industrial y Bases de Datos respectivamente.

Se agradece a los revisores del artículo las constructivas sugerencias realizadas.

## REFERENCIAS

- [1] Dominguez Cano, R. (abril 26 de 2016). *Operación y mantenimiento del sistema de cable aéreo en el Metro de Medellín*. Obtenido de <http://www.nxtbook.com/ml/MetroMedellin/MetroMedellinEnero2007/index.php?startid=65>
- [2] Marquez Ramirez, R. (abril 26 de 2016). *Tecnología Cable Aéreo. I+D+i: un distintivo METRO, un punto de referencia internacional*. Obtenido de <http://miaportemetro.com/revista/cable.htm>.
- [3] Hoffmann, K. (2006). *Recent developments in cable-drawn urban transport systems*. *FME Transactions*. Vol. 34. No. 4, p.p. 205-212.
- [4] Metro de Medellín. (abril 26 de 2016). *Ejemplo de intermodalidad. Sistema de transporte por cable aéreo integrado al Metro de Medellín*. Obtenido de [http://uprati.uprm.edu/interns/medellin/MetroCable\(PuertoRico\).pdf](http://uprati.uprm.edu/interns/medellin/MetroCable(PuertoRico).pdf)
- [5] Dávila, J., (2012). *Movilidad urbana y pobreza. Aprendizajes de Medellín y Soacha, Colombia*. The Development Planning Unit, UCL | Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- [6] Dale, S., Imhäuser, T., Chu, N., (2013), *Creative Urban Projects*. Creative Urban Projects Inc.
- [7] Quintero O., Castañeda L., Trujillo A. (2014), “*Design of a methodology for a SCADA expert system: massive transportation ropeway*”. Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, CLCA 2014, ResearchGate, p.p. 905-910.
- [8] Optin, T. (2007), *Intelligent SCADA systems*, Automation & Control Technical, EngineerIT.
- [9] Villa L., Quintero O., Castañeda L., Mejía G (2015), “*Fuzzy Inference System for Modelling Failure Modes in a Ropeway for Massive Transportation*”. International conference on Artificial Intelligence and Industrial Engineering. Atlantis Press, p.p. 113-116.
- [10] Copete P. (abril 26 de 2016). *Mantenimiento Basado en Condicion CBM*. Obtenido de [en:http://portal.tc.com.co/tecnicontrol/soluciones/confiabilidad-operacional/cbm](http://portal.tc.com.co/tecnicontrol/soluciones/confiabilidad-operacional/cbm)
- [11] Martinod R., Estepa D., Paris C., Pineda F, Restrepo J., Castañeda L., G. Mejía (2014), “*Operating conditions effect over the coupling strength for urban aerial ropeways*”. *Transport problems*. Vol. 9, Ed. 3, p.p. 5-14.
- [12] Primorac, C., Mariño, S. (abril 26 de 2016) “*Un sistema experto para asistir decisiones turísticas. Diseño de un prototipo basado en la web*”. Revista de investigación en turismo y desarrollo local. vol. 4, No 10. Obtenido de <http://www.eumed.net/rev/curydes/10/pm.pdf>.
- [13] International Standard ISO (ISO 13379-1:2012 (E)), *Condition monitoring and diagnostics of machines – Data interpretation and diagnostics techniques – Part 1: General guidelines*.