



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS
Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería

**Evaluación de la condición en líneas de transmisión
mediante técnicas de análisis de datos**

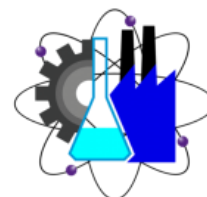
Proyecto de tesis para obtención de grado de Ingeniero
Eléctrico – Electrónico

Presenta

Karla Janneth Gutiérrez Gutiérrez

Asesor

Dr. Alberto Reyes Ballesteros



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

Resumen

El objetivo de este trabajo es buscar una alternativa para robustecer la forma en que la CFE evalúa la condición de las líneas de transmisión.

EL desarrollo se basa en la idea de obtener el índice de condición a futuro y así poderse anticipar en la gestión del mantenimiento

Para darle un peso distintivo a los subsistemas que forman la línea de transmisión se generaron y evaluaron tres alternativas de ponderación, una basada en estadística por ocurrencia de fallas, otra por tiempos de salida por subsistema y la opinión de expertos. La generación de los dos primeros casos se realizó mediante análisis estadístico que se consideró una base de datos históricos reales de la CFE con 9074 registros de los años 2004 al 2012. El tercer caso se basó en la opinión de los expertos del INEEL y de la Gerencia de Líneas de la CFE sobre las ponderaciones de los subsistemas usadas para el caso de una torre autosoportada. La evaluación de alternativas se realizó utilizando la técnica de proceso jerárquico analítico (AHP), y a través de la cual se determinaron los porcentajes más confiables para los subsistemas de una LT.

Para determinar la evaluación de componentes a futuro se usó un modelo de degradación basado en redes recurrentes. Como caso de estudio se utilizó el modelo de un aislador sintético, el cual para su entrenamiento utilizó una base de datos sintéticos, aproximando valores a una curva característica de vida útil experimental.

Como producto adicional, se obtuvo un modelo de fallas a futuro basado en el modelo de degradación comentado y un modelo de fallas bayesiano. De acuerdo con el análisis realizado se concluye que es posible robustecer la forma de evaluar la condición de las LT's mediante:

- Una ponderación realista de los subsistemas que conforman la línea de transmisión, y que la CFE considera para evaluar la confiabilidad de la línea.
- Mediante el modelo de degradación de componentes de LT's basado en técnicas de aprendizaje profundo, es posible anticiparse a la condición de una línea a futuro y a una posible falla en algún componente, así mismo como observar la evolución de un componente a futuro.
- El modelo de degradación, que permite anticipar el estado de un componente a futuro, tiene doble utilidad: i) el cálculo del índice de condición a futuro, ii) la detección de fallas a futuro.

Palabras clave: *Índice de condición, subsistema, proceso jerárquico analítico, degradación, curva característica de vida útil.*

Abstract

The objective of this work is to find an alternative to strengthen the way in which the CFE evaluates the condition of the transmission lines.

The development is based on the idea of obtaining the condition index in the future and thus being able to anticipate maintenance management

In order to give a distinctive weight to the subsystems that make up the transmission line, three weighting alternatives were generated and evaluated, one based on statistics for the occurrence of faults, another for output times by subsystem and the opinion of experts. The generation of the first two cases was carried out through statistical analysis that used a real historical database of the CFE with 9074 records from the years 2004 to 2012. The third case was based on the opinion of the experts of the INEEL and the Management of Lines of the CFE on the weightings of the subsystems used for the case of a self-supporting tower. The evaluation of alternatives was carried out using the analytical hierarchical process (AHP) technique, and through which the most reliable percentages for the subsystems of a TL were determined.

To determine the evaluation of future components, a degradation model based on recurrent networks will be used. As a case study, the model of a synthetic insulator was obtained, which for its training obtained a synthetic database, approximating values to a characteristic curve of experimental useful life.

As an additional product, a future failure model based on the commented degradation model and a Bayesian failure model were obtained. According to the analysis carried out, it is concluded that it is possible to strengthen the way of evaluating the condition of the TL by:

- A realistic weighting of the subsystems that make up the transmission line, and that the CFE considers to assess the reliability of the line.
- Through the LT component degradation model based on deep learning techniques, it is possible to anticipate the condition of a line in the future and a possible failure in a component, as well as observe the evolution of a component in the future.
- The degradation model, which makes it possible to anticipate the state of the future, has a double use: i) the calculation of the future condition index, ii) the detection of future faults.

Keywords: *Condition index, subsystem, analytical hierarchical process, degradation, useful life characteristic curve.*

Agradecimientos

Agradezco a Dios por otorgarme la vida, por guiarme y acompañarme en este camino llamado, por darme fortaleza para seguir adelante en aquellos momentos difíciles.

Agradezco todos mis docentes que me acompañaron durante este proceso, a mi asesor el Dr. Alberto Reyes Ballesteros, por compartir sus conocimientos y por su paciencia.

También al Departamento de Transmisión y Distribución del Instituto Nacional de Energías Limpias, es especial al M.C. Ramiro Hernández Corona.

A la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería por la formación que me brindaron.

A mis padres por confiar en mí, por los valores y principios que me han inculcado.

Por último, a mis familiares y mis amigos de la vida y de la facultad, por el apoyo diario.

Dedicatorias

Dedico con todo mi corazón el presente trabajo a mis padres que me dieron la vida y me han otorgado su cariño y apoyo de manera incondicional, por enseñarme que con esfuerzo y dedicación nada es imposible.

A mi hermano por su cariño, compañía y por qué me ha demostrado que no pude tener un mejor hermano.

Contenido

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN | II |
| ABSTRACT | III |
| AGRADECIMIENTOS | V |
| DEDICATORIAS..... | VI |
| CONTENIDO | VII |
| LISTA DE TABLAS | IX |
| LISTA DE FIGURAS | X |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 MOTIVACIÓN..... | 1 |
| <i>Objetivo general</i> | 2 |
| <i>Objetivos específicos</i> | 2 |
| <i>Justificación</i> | 2 |
| <i>Alcance</i> | 2 |
| 1.2 TRABAJO RELACIONADO DE LAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE DATOS E INTELIGENCIA ARTIFICIAL | 3 |
| 1.2.1 <i>Sistema de Inferencia Difusa</i> | 3 |
| 1.2.2 <i>Estimación de la vida útil mediante regresión con Redes Neuronales</i> | 4 |
| 1.2.3 <i>Modelo de Vida Útil para Estructuras Acero-Zinc utilizadas en la Transmisión de Energía Eléctrica en Colombia</i> | 5 |
| 2 COMPONENTES DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN Y FALLAS COMUNES | 10 |
| 2.1 COMPONENTES DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN | 10 |
| 2.2 FALLAS COMUNES..... | 12 |
| 3 INDICADOR DE CFE PARA EVALUAR LA CONFIABILIDAD DE SUS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN. | 14 |
| 3.1 <i>Representación del sistema de LT para el análisis de su condición</i> | 14 |
| 3.2 <i>Componentes de los subsistemas</i> | 15 |
| 4 MARCO TEÓRICO | 18 |
| 4.1. MÉTODO BASADO EN LA CONDICIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SALUD DE ACTIVOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN..... | 18 |
| 4.2 PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA | 20 |
| 4.3 REDES RECURRENTES..... | 24 |
| 4.3.1 <i>Aprendizaje profundo</i> | 24 |
| 4.3.2 <i>Redes neuronales artificiales</i> | 24 |
| 4.3.3 <i>Redes recurrentes</i> | 26 |
| 4.4 APRENDIZAJE BAYESIANO | 28 |
| 4.4.1 <i>Aprendizaje automático</i> | 28 |
| | 29 |
| 4.4.2 <i>Redes Bayesianas</i> | 29 |
| 5 EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE DATOS | 31 |
| 5.1 ALGORITMO DE CÁLCULO DE LA CONDICIÓN A FUTURO | 32 |
| 5.1.1 <i>Determinación de ponderaciones mediante estadística</i> | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 5.1.1.1 Agrupación de fallas por subsistemas | 33 |
| 5.1.2 Mapa de diagnóstico (opinión de expertos) | 34 |
| 5.2 EVALUACIÓN DE ELEMENTOS DE LA LT A FUTURO | 35 |
| 5.3 ESTIMACIÓN DE FALLAS DE ELEMENTOS DE LA LT A FUTURO | 36 |
| 5.3.1 Modelo de fallas | 36 |
| 6 RESULTADOS EXPERIMENTALES | 37 |
| 6.1 MODELO DE FALLAS | 37 |
| 6.1.1 Selección de atributos | 37 |
| 6.1.2 Modelo de fallas | 38 |
| 6.2 MODELO DE DEGRADACIÓN MEDIANTE REDES RECURRENTE | 40 |
| 6.2.1 Aislador sintético en contaminación industrial y salina muy alta | 44 |
| 6.2.2 Aislador sintético en contaminación industrial y salina media | 46 |
| 6.2.3 Aislador sintético en contaminación industrial y salina ligera | 47 |
| 6.3 CÁLCULO DE ÍNDICE DE CONDICIÓN A FUTURO | 50 |
| 6.3.1 Estadística de fallas | 50 |
| 6.3.1.1 Estadística por ocurrencia de fallas | 50 |
| 6.3.1.2 Estadística por tiempos de salida por falla | 51 |
| 6.3.2 Selección de la mejor ponderación con Analytical Hierarchy Process | 52 |
| 6.3.3 Cálculo del índice de condición a futuro | 55 |
| CONCLUSIONES | 58 |
| BIBLIOGRAFÍA | 60 |

Lista de tablas

| | |
|--|--------------------------------------|
| Tabla 1 Funciones de corrosión y factores de pérdida de la masa del acero. _____ | 6 |
| Tabla 2 Funciones de corrosión y factores de pérdida de masa del zinc. _____ | 7 |
| Tabla 3 Clasificación del tipo de estructuras de una línea de transmisión. _____ | 11 |
| Tabla 4 Elementos que conforman una línea de transmisión. _____ | 16 |
| Tabla 5 Fallas ordinarias. _____ | 17 |
| Tabla 6 Fallas extraordinarias. _____ | 17 |
| Tabla 7 Parámetros para la clasificación de la salud. _____ | 20 |
| Tabla 8 Escala fundamental de Saaty. _____ | 23 |
| Tabla 9 Agrupación de fallas por subsistemas. _____ | 33 |
| Tabla 10 Contabilidad de aciertos en el modelo. _____ | 40 |
| Tabla 11 Vida útil de un aislador de hule silicón con alúmina T. _____ | 41 |
| Tabla 12 Cálculo del MAPE. _____ | 43 |
| Tabla 13 Error porcentual absoluto medio para cada prueba realizada. _____ | 49 |
| Tabla 14 Frecuencia porcentual acumulada de cada criterio. _____ | 50 |
| Tabla 15 Frecuencia porcentual acumulada de cada criterio. _____ | 51 |
| Tabla 16 Determinación de pesos. _____ | 53 |
| Tabla 17 Matriz completa. _____ | 54 |
| Tabla 18 Matriz de prioridades. _____ | 54 |
| Tabla 19 Comparación de alternativas. Criterio 1. _____ | 55 |
| Tabla 20 Matriz de importancia. _____ | 55 |
| Tabla 21 Ponderaciones recalculadas por el ajuste de pesos _____ | 56 |
| Tabla 22 Nuevas ponderaciones _____ | ¡Error! Marcador no definido. |
| Tabla 23 Calculo del índice de condición. _____ | 57 |

Lista de figuras

| | | |
|------------------|---|-----------|
| <i>Figura 1</i> | <i>Perceptron simple</i> | <i>4</i> |
| <i>Figura 2</i> | <i>Corrosión del acero por zona.</i> | <i>8</i> |
| <i>Figura 3</i> | <i>Corrosión del zinc por zona.</i> | <i>8</i> |
| <i>Figura 4</i> | <i>Vida útil altura 3/16 Zona 1.</i> | <i>9</i> |
| <i>Figura 5</i> | <i>Elementos de una LT aérea, torre Autosoportada.</i> | <i>10</i> |
| <i>Figura 6</i> | <i>Torre Autosoportada, 4 patas.</i> | <i>11</i> |
| <i>Figura 7</i> | <i>Tipos de aisladores, de izquierda a derechas: aislador de vidrio, aislador cerámico y aislador sintético.</i> | <i>12</i> |
| <i>Figura 8</i> | <i>Propuesta del proceso para determinar el índice de salud en LTs.</i> | <i>18</i> |
| <i>Figura 9</i> | <i>Matriz ilustrativa</i> | <i>21</i> |
| <i>Figura 10</i> | <i>Modelo jerárquico general.</i> | <i>21</i> |
| <i>Figura 11</i> | <i>Estructura de una red neuronal artificial.</i> | <i>25</i> |
| <i>Figura 12</i> | <i>Metodología del aprendizaje automático.</i> | <i>29</i> |
| <i>Figura 13</i> | <i>Ejemplo de red bayesiana.</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 14</i> | <i>Diagrama a bloques de la evaluación de la condición en líneas de transmisión mediante análisis de datos.</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 15</i> | <i>Metodología para la determinación de ponderaciones mediante análisis estadístico</i> | <i>33</i> |
| <i>Figura 16</i> | <i>Grafica de degradación [1]</i> | <i>36</i> |
| <i>Figura 16</i> | <i>Estructura del modelo causal seleccionado.</i> | <i>37</i> |
| <i>Figura 17</i> | <i>Modelo de fallas.</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 18</i> | <i>Registros de la condición de un aislador sintético.</i> | <i>42</i> |
| <i>Figura 19</i> | <i>Topología de la Red LSTM pronostico a un solo paso.</i> | <i>43</i> |
| <i>Figura 20</i> | <i>Valores predichos para la condición del aislador sintético.</i> | <i>45</i> |
| <i>Figura 21</i> | <i>Datos pronosticados y los reales contra la secuencia que genero dichos valores.</i> | <i>45</i> |
| <i>Figura 22</i> | <i>Valores predichos para la condición del aislador sintético.</i> | <i>46</i> |
| <i>Figura 23</i> | <i>Datos pronosticados y los reales contra la secuencia que genero dichos valores. La cruz muestra el valor real y el punto verde el valor de la predicción un paso hacia adelante.</i> | <i>47</i> |
| <i>Figura 24</i> | <i>Valores predichos para la condición del aislador sintético. La línea color naranja corresponde a los datos de entrenamiento y la línea azul corresponde a los valores predichos.</i> | <i>48</i> |
| <i>Figura 25</i> | <i>Datos pronosticados y los reales contra la secuencia que genero dichos valores.</i> | <i>49</i> |
| <i>Figura 26</i> | <i>Representación gráfica de los porcentajes de ocurrencia de cada criterio.</i> | <i>50</i> |
| <i>Figura 27</i> | <i>Representación gráfica de los porcentajes de tiempo de salida de cada criterio.</i> | <i>52</i> |

1 Introducción

1.1 Motivación

Las líneas de transmisión son el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión y distribución de la energía eléctrica, y están constituidas por: conductores, estructuras de soporte, aisladores, accesorios de ajustes entre aisladores y estructuras de soporte, hilos de guarda, etc. Por su importancia, es necesario tener un diagnóstico permanente y confiable que permita planificar adecuadamente sus acciones de mantenimiento.

Los elementos de una línea de transmisión tienen una vida útil promedio de 30 años, pero con un adecuado mantenimiento pueden durar hasta 50 años. Mediante una revisión general y preventiva, que permita tener disponibles al cien por ciento la condición de los elementos, se puede alcanzar una alta confiabilidad de las líneas de transmisión

Actualmente, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) evalúa las líneas de transmisión mediante un índice de confiabilidad para un solo tipo estructura de soporte, como simplificación de la evaluación. Este indicador proporciona una estimación del estado en que se encuentra una línea de transmisión. Para el cálculo del indicador, se consideran cinco subsistemas, cuya suma ponderada dan como resultado el índice de confiabilidad.

Con objeto de robustecer la forma de evaluar la condición de las Líneas de Transmisión (LT's) y programar el mantenimiento de sus activos eficazmente en la Red Nacional de Transmisión (RNT), se está desarrollando en el INEEL el proyecto PE-A-11 "Desarrollo de un Sistema de Gestión del mantenimiento, basado en la condición y riesgo, en Líneas de Transmisión, como parte de la conformación y desarrollo del Centro Mexicano de Innovación en Redes y Microrredes Eléctricas Inteligentes (CEMIE-Redes). En este proyecto se han redefinido la forma de evaluar las LT's a través de la implementación de técnicas de mantenimiento basado en la condición y riesgo, considerando los principales tipos de estructuras de soporte utilizadas en la RNT.

El principal reto en esta investigación es que no existen datos suficientes para estimar la incidencia de fallas a futuros; por lo tanto, lo antes mencionado ocasiona que no sea posible predecir y prevenir fallas eficientemente mediante en el indicador que actualmente estima la CFE. Esta situación puede estar provocando elevados gastos en el reemplazo de piezas, como seguimiento y mantenimiento para conservar o mejorar la confiabilidad de las líneas de transmisión.

Para solventar la problemática antes expuesta, se utilizan técnicas de análisis de datos, Inteligencia artificial y la opinión de expertos considerando los datos históricos disponibles que describen el estado de cada elemento de la LT. Se realiza un análisis estadístico, a partir del cual se desarrolla un algoritmo para predecir las

posibles fallas, el cual podrá ser utilizado en el proyecto que realiza el INEEL para recomendar el plan de mantenimiento óptimo de las líneas de transmisión.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera. En el capítulo uno se describe brevemente la problemática que existe, así como los objetivos y alcance de esta investigación. En el capítulo dos se describen de manera general algunos términos técnicos, así como las partes que conforman una línea de transmisión. En el capítulo tres se describe el indicador que utiliza la CFE para evaluar las LT's. En el capítulo cuatro consiste en la recopilación de antecedentes, aspectos teóricos en las que se sustenta un proyecto de investigación. En el Capítulo cinco se muestra la determinación de las ponderaciones de cada subsistema, así como el método para evaluar las líneas de condición. En el Capítulo seis se muestran los resultados obtenidos por cada experimento realizado, así como las conclusiones.

Objetivo general

El objetivo de este trabajo es buscar la mejor alternativa para robustecer la manera de evaluar la condición de las LT's mediante las ponderaciones de los subsistemas considerados por CFE para el cálculo del índice de confiabilidad de las líneas de transmisión. Para seleccionar de la mejor ponderación, se consideran las estadísticas de ocurrencia de fallas y el tiempo de salida de componentes por fallas, además de la experiencia del inspector de líneas de transmisión.

Objetivos específicos

- Evaluar modelos de diagnóstico de fallas bayesianos y modelos predictivos de degradación basado en inteligencia artificial.
- Proponer la técnica de AHP para seleccionar las ponderaciones en forma multifactorial, a manera de contribuir en el cálculo del índice de condición.
- Considerar el modelo de degradación de componentes de líneas basado en técnicas de aprendizaje automático, para anticiparse a una posible falla en algún componente. Dicho modelo mostrará la evolución de un componente a futuro, así como la probabilidad de falla.

Justificación

La presente investigación contribuirá en el desarrollo de un sistema de gestión del mantenimiento que sea capaz de determinar el índice confiable de condición de una LT con estructuras de soporte tipo Autosoportada.

Alcance

El presente trabajo comprende el análisis de información sobre el cálculo de condición en líneas de transmisión y la predicción de fallas para optimizar costos de mantenimiento a futuro.

El tipo de estructura considerada es la Autosoportada.

Para el cálculo de la condición y estimación de fallas, los elementos de la LT considerados, en el presente trabajo, son aquellos que pertenecen al conjunto de subsistemas que actualmente tiene definidos CFE, para el cálculo del índice de confiabilidad, que son: Descargas Atmosféricas, contaminación, cimentaciones y estructura.

La estimación de degradación de los elementos de la LT se ejemplifica con el elemento aislador sintético.

El presente trabajo integrará los resultados de la aplicación de distintas metodologías de Inteligencia artificial (IA), estadística y la obtención de modelos realizados.

1.2 Trabajo relacionado de las técnicas de análisis de datos e inteligencia artificial

1.2.1 Sistema de Inferencia Difusa

La inspección visual es un proceso inherentemente difuso, por lo que, en este método, se utiliza la lógica difusa como candidata para el mejoramiento de la inspección visual en LT's.

El sistema de inferencia difusa [1] está compuesto por las entradas, que corresponden a las evaluaciones realizadas por el inspector; una *máquina de inferencia o motor de inferencia*, que se desarrolla bajo reglas difusas, y una salida que indica la condición del componente.

Las reglas difusas describen la relación entre premisas y consecuencias de las entradas del sistema y se expresan en términos *If, Then* (Sí, Entonces), es decir, *If* es la premisa y *Then* es la consecuencia.

Mediante este método, con una evaluación visual es posible inferir la apariencia física y condición de cada elemento. La inferencia debe ser realizada por el *motor de inferencia* y no por el inspector, esto con la finalidad de evitar emitir algún juicio. Debido a que se utiliza la misma base de conocimientos en el motor de inferencia, se logra la coherencia en la salida

Una de las limitantes de este método es que, a pesar del uso de la guía de inspección, la subjetividad para determinar el nivel de defecto en un componente de las LT's todavía existe, ya que los resultados de la inspección ahora dependen de la opinión del inspector.

La salida la de *máquina de inferencia* está restringida por el diseño, y el número de funciones de pertenencia y reglas de la base de conocimientos, en el motor de inferencia.

1.2.2 Estimación de la vida útil mediante regresión con Redes Neuronales

Una regresión es un proceso o modelo que permite investigar las relaciones entre una variable dependiente y una o varias variables independientes. Así, a partir de dicho estudio, se establece una relación matemática. El objetivo del análisis es construir una función que permita estimar el valor futuro de la variable de estudio.

Menacho [2] menciona que una de las propiedades que poseen las redes neuronales es su aplicación sin la necesidad de considerar el cumplimiento de supuestos teóricos, debido a que los modelos de redes neuronales son considerados nuevos paradigmas alternativos para el análisis estadístico predictivo. Al igual que los modelos estadísticos, estos permiten describir muchos fenómenos del mundo real.

Se han realizado diversos estudios comparativos entre los modelos estadísticos y las redes neuronales en problemas de predicción, clasificación y análisis descriptivo. Los resultados obtenidos no muestran grandes diferencias entre un modelo y otro.

Menacho [2] considera el modelo red neuronal *perceptron* como un modelo de mayor aplicación. El modelo *perceptron* simple consta de una capa de entrada, una capa oculta y una de salida. Es un modelo de gran uso y resulta eficiente para modelar muchas situaciones del mundo real.

La estructura del *perceptron* está conformada por una capa de entrada con una neurona, que permite recibir los valores de las variables predictoras; una neurona en la capa oculta, donde se realiza la acumulación de la entrada (entrada neta), para obtener la salida esperada, y una capa oculta de salida donde se compara la salida esperada con la salida observada. La diferencia entre la salida esperada y la salida observada es el cálculo del error o residual, como se muestra en la Figura 1.

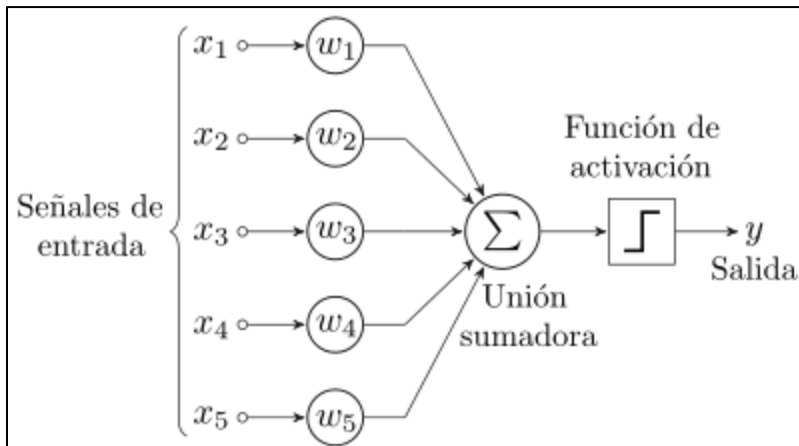


Figura 1 Perceptron simple

La única neurona de salida del *perceptron* realiza la suma ponderada para obtener la entrada neta y restar un valor de umbral. El resultado se aplica a lo que se denomina función de transferencia tipo escalón. Una función de transferencia es

una función matemática lineal que emplea la transformada de Laplace y permite representar el comportamiento dinámico y estacionario de cualquier sistema. Los valores de los pesos pueden fijarse o hallarse utilizando diferentes algoritmos de entrenamiento de la red.

El aprendizaje del *perceptron* simple consiste en calcular la combinación lineal a partir de un conjunto de variables de entrada que con la aplicación de una función de activación da lugar a la salida de la red. Así, los pesos de la red se van ajustando por el método de aprendizaje supervisado por corrección de error, de tal manera que se va comparando la salida esperada con el valor de la variable de salida que

se desea obtener, la diferencia es el error o residual. El aprendizaje termina cuando al considerar cada valor de las variables de entrada, los residuales son cero o muy próximos a cero.

1.2.3 Modelo de Vida Útil para Estructuras Acero-Zinc utilizadas en la Transmisión de Energía Eléctrica en Colombia

La corrosión atmosférica es la degradación y destrucción de los materiales metálicos, cuando estos interactúan con la atmósfera; es un proceso lento y ocurre de manera espontánea, el cual se puede prevenir o controlar, pero no se puede evitar y, por lo tanto, genera fallas en el sistema impactando la seguridad y la disponibilidad de las estructuras de soporte.

Villada et. al. [3] proponen encontrar la curva de vida útil de las estructuras mediante modelos predictivos con el fin de cuantificar los impactos y efectos de los procesos de degradación. Se identifican tres aspectos importantes, que son: a) la definición de la *tasa de corrosión*, b) la *función de distribución de probabilidad* para una determinada tasa de corrosión o vida útil y c) las *actividades* que inciden en la vida útil.

La variable fundamental para estimar la vida útil de una estructura es la tasa de corrosión de Kutz [4], la cual se puede obtener mediante la razón entre la tasa de corrosión y el grosor mínimo de la estructura.

El modelo desarrollado en este trabajo consiste en identificar el mecanismo de degradación con el fin de estimar la vida útil de los materiales en cada zona donde se encuentra instalada la estructura. Para establecer la vida útil media perteneciente a cada zona, se asume una distribución Weibull la cual se obtiene mediante una función de distribución de probabilidad usando simulación de datos aleatorios utilizando MATLAB ® R. Para cada zona, se implementó una cadena de Markov en función de la vida útil obtenida de las funciones de degradación y la duración en cada estado para obtener la tasa de cambio, y de esta manera poder evaluar la

disponibilidad A(t) del sistema. El modelo se implementó en Relex ® Reliability Studio 2007 v2 -Evaluation-.

El modelo requirió datos de variables atmosféricas tales como temperatura, humedad relativa, altitud, y Tiempo de Humectación (TdH). Estos datos se recolectaron durante un periodo de un año en distintas zonas del Colombia. El total de datos recolectados fueron 114 puntos, que se

clasificaron en cuatro zonas (Zi) con base en el nivel de agresividad de corrosión. Las zonas clasificadas fueron las siguientes:

Z1: Altos cloruros y sulfatos medios

Z2: Alto contenido de sulfatos

Z3: Sulfatos moderados a bajo

Z4: Bajo contenido de cloruros y sulfatos.

La función de corrosión (TC) de estructuras de acero, para predicciones menores a 10 años, se rige con la siguiente expresión:

$$T_{CAcero} = \frac{PMZ_n}{0,2358 \cdot t} \quad \text{Ecuación 1}$$

Las funciones de corrosión, para predicciones iguales o mayores a 10 años, se muestran en la Tabla 1. La Tabla 1 también muestra los factores de pérdida de masa (PMZn) para las cuatro zonas establecidas, como y, reportado en Colciencias/CREG [5].

Tabla 1 Funciones de corrosión y factores de pérdida de la masa del acero.

| | PM para t < 10 años | T _C para t ≥ 10 años |
|----|---|---------------------------------|
| Z1 | $\frac{26.1698}{1+12.6337 \cdot e^{-0.804555 \cdot (0.9095 \cdot P - 0.6381)}}$ | $8.556 \cdot t^{0.63}$ |
| Z2 | $\frac{23.2509}{1+3.6444 \cdot e^{-0.185294 \cdot (0.903 \cdot P + 0.3881)}}$ | $44.536 \cdot t^{0.4}$ |
| Z3 | $0.801176 + 0.433684 \cdot (0.9185 \cdot P - 0.6739)^2$ | $12.956 \cdot t^{0.58}$ |
| Z4 | $\frac{3.83184}{1+4.98507 \cdot e^{-0.0117863 \cdot ((TdH+1)/2)}}$ | $13.623 \cdot t^{0.3}$ |

La función de corrosión (TC) de estructuras de zinc, para predicciones menores a 10 años, se rige bajo la siguiente expresión:

$$T_{CZinc} = \frac{PMZ_n}{0,2142 \cdot t} \quad \text{Ecuación 2}$$

Las funciones de corrosión, para predicciones iguales o mayores a 10 años, se muestran en la Tabla 2. La Tabla 2 también muestra los factores de pérdida de masa (PMZn) para las cuatro zonas establecidas. y. En el caso de estructuras de zinc para las zonas 2 y 4, la función de corrosión para predicciones menores a 10 años es igual a la función de predicción igual o mayor a 10 años [\[5\]](#).

Tabla 2 Funciones de corrosión y factores de pérdida de masa del zinc.

| | PM para t < 10 años | T _C para t ≥ 10 años |
|----|--|---------------------------------|
| Z1 | $\frac{0.774665}{1+5.39455 \cdot e^{-0.853295(0.9095P-0.6381)}}$ | $3.103 \cdot t^{0.97}$ |
| Z2 | $1.369 \cdot t^{0.9}$ | |
| Z3 | $0.0153304+0.000469505 \cdot (0.9185 \cdot P-0.6739^2)^{1/2}$ | $0.731 \cdot t^{0.9}$ |
| Z4 | $1.099 \cdot t^{0.8}$ | |

Donde:

T: tiempo en años

P: tiempo en bimestres

Los datos descritos anteriormente permitieron caracterizar 21 puntos medidos y el respectivo comportamiento de los materiales. Con base en esta caracterización se puede aproximar el comportamiento de los materiales en otras zonas que no hicieron parte de la experimentación.

Considerando que en las estructuras de las líneas de transmisión se utilizan grosores de 3/16 a 1/2 pulgada, se utilizó el grosor mínimo 3/16 para establecer el mayor impacto sobre la vida útil en función del grosor y el tiempo.

En las Figura 2 y 3 , se muestra la pérdida de grosor en el tiempo del acero y el zinc, respectivamente. (Se asume que la pérdida de grosor se realiza de manera uniforme sobre las placas instaladas).

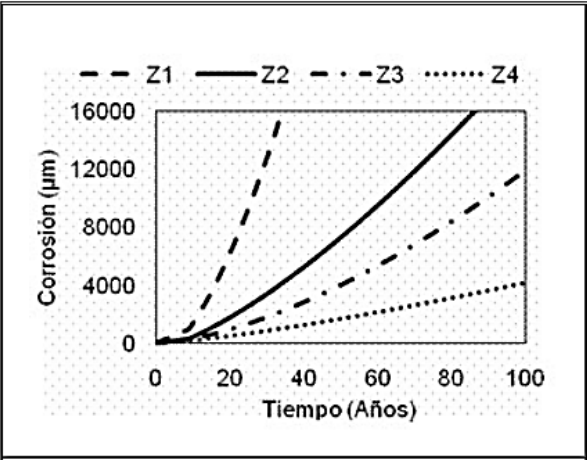


Figura 2 Corrosión del acero por zona.

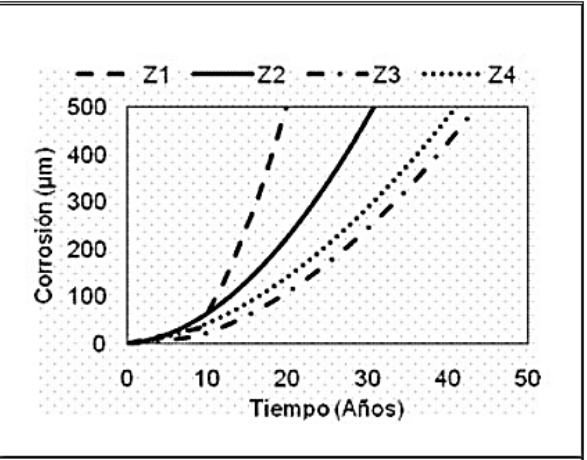


Figura 3 Corrosión del zinc por zona.

Se realizó una comparación de vida útil de las estructuras para la zona 1, considerando dos tipos de escenarios. El primero corresponde a una zona con alta presencia de vientos y contaminación industrial moderada a alta (A1), el segundo sólo considerando un componente industrial moderado a alto (A2) comparado con la Zona (Z1). En la Figura 4 se observa la incidencia de la altura sobre la vida útil de estructuras de 3/16 de pulgada.

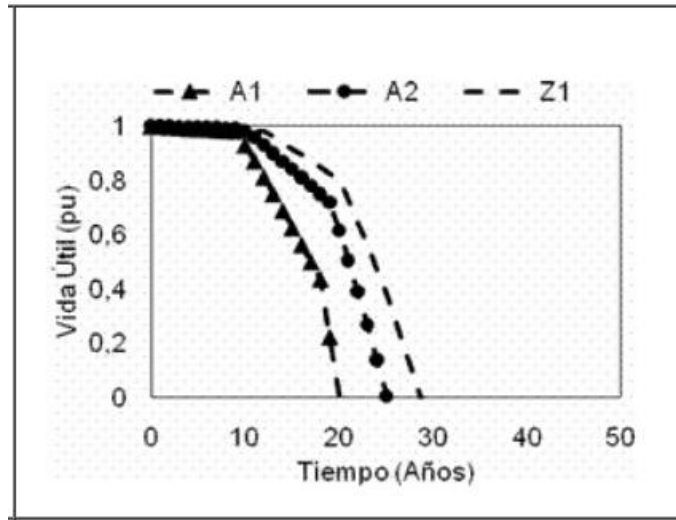


Figura 4 Vida útil altura 3/16 Zona 1.

2 Componentes de una línea de transmisión y fallas comunes

2.1 Componentes de una línea de transmisión

Una línea de transmisión es el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión y distribución de la energía eléctrica, desde su generación hasta un usuario. Está constituida por conductores, estructuras de soporte, aisladores, cables de guarda y accesorios de ajustes entre los aisladores y la estructura de soporte.

Las líneas de transmisión poseen un papel importante en un sistema de potencia, aparte de ser el medio de transmisión de la energía, proporciona los medios para un funcionamiento eficaz, económico, fiable y seguro del Sistema de Eléctrico Nacional.

Los elementos principales de una línea de transmisión se muestran en la Figura 5, su descripción se presenta a continuación.



Figura 5 Elementos de una LT aérea, torre Autosostenida.

a) Estructura

Son el elemento más visible en un sistema de transmisión de energía, además de mantener separados entre si los conductores tienen otro propósito que es soportar los elementos que integran una LT. Deben resistir la acción de los fenómenos naturales como son el viento, el hielo y los sismos. Los tipos de clasificación de las estructuras se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 Clasificación del tipo de estructuras de una línea de transmisión.

| Clasificación de las estructuras | |
|----------------------------------|--|
| Por su utilización | Suspensión Deflexión Remate Transposición |
| Por la tensión de operación | 400 kV 230 kV 115 kV combinado |
| Por el No. De circuitos | 1 circuito 2 circuitos 4 circuitos |
| Por la condición de apoyo | Autosoportada Con retenidas |
| Por la forma | Verticales Delta |

El enfoque en esta investigación es una torre auto soportada. La Figura 6 muestra el tipo de torre Autosoportada, considerada en el presente trabajo de tesis.



Figura 6 Torre Autosoportada, 4 patas.

b) Conductor

El medio por el cual se transmite la corriente nominal son los conductores.

Existen distintos tipos de conductores para transportar dicha corriente, el más utilizado por las empresas del sector en el mundo es el tipo ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced). Conductor de aluminio con acero reforzado.

c) *Aisladores*

Son los encargados de sujetar los conductores a las estructuras asegurando así el aislamiento entre estos dos elementos. Pueden ser de vidrio, porcelana o sintético, como se muestra en la Figura 7.



Figura 7 Tipos de aisladores, de izquierda a derechas: aislador de vidrio, aislador cerámico y aislador sintético.

d) *Herrajes y accesorios*

Son aquellos elementos que unen los aisladores, fijan la cadena de aisladores, sujetan los conductores o unen más o dos conductores.

e) *Apartarrayos*

Son aquellos elementos que se encargan de suprimir las sobretensiones generadas por descargas atmosféricas o por alguna falla en el sistema. Dichas sobretensiones pueden dañar el aislamiento de las LT's, por lo tanto, es necesario suprimirlas.

f) *Conductor de puesta a tierra*

Es el conductor mediante el cual se conecta una estructura metálica, un equipo o el circuito de puesta a tierra al electrodo o red de tierra.

g) *Cable de guarda*

Un cable de guarda es utilizado para proteger las torres contra las descargas eléctricas.

2.2 Fallas comunes

El seguimiento de un plan de mantenimiento incorrecto, fenómenos naturales o vandalismo provocan la presencia de fallas en un sistema de LT's. Dentro de las fallas existentes, se describen a continuación aquellas que se presentan históricamente con mayor frecuencia, en las líneas de transmisión de México, que son las siguientes

- a) **Descargas Atmosféricas:** Es causado principalmente por rayos durante una tormenta eléctrica.
- b) **Quema de bosque:** Salida de línea ocasionada por quema de maleza e incendios provocados por terceras personas.
- c) **Contaminación:** Salida de línea por falla de aislamiento debido a la acumulación de excremento y nidos de aves, vegetación, sal, polvo, fertilizante y neblina en el aislamiento de la línea.
- d) **Vandalismo:** Salida de la línea ocasionada por vandalismo, disparos de armas de fuego y pedradas que dañan los conductores o el aislamiento, así como otros objetos externos que arrojados intencionalmente ocasionan fallas en la línea.
- e) Salida de la línea ocasionada por personas desconocidas al robar el conductor o el cobre de puesta a tierra de la estructura.
- f) **Herrajes:** Salida de la línea por rotura de estribos, pernos, tornillos, ganchos bola, eslabones, accesorios para suspensión o remate de cables.
- g) **Brecha:** Salida por falla ocasionada por vegetación cercana y/o pegada a la línea, caída de árbol sobre la línea, etc.
- h) **Extraordinarias:** Se refiere a fallas causadas por disturbios del sistema o fallas técnicas.

3 Indicador de CFE para evaluar la confiabilidad de sus líneas de transmisión.

Actualmente, la CFE de transmisión estima un indicador para evaluar la confiabilidad de sus líneas de transmisión. Este indicador se calcula mediante una hoja en Excel llamada Mapa de Diagnóstico. Este mapa de diagnóstico está organizado por los subsistemas que afectan la confiabilidad de las líneas de transmisión, en México. A su vez, cada subsistema está representado por los componentes que determinan la condición operativa de cada subsistema.

La descripción de los subsistemas y los componentes del mapa de diagnóstico de CFE se presenta a continuación.

3.1 Representación del sistema de LT para el análisis de su condición

El sistema de las LT se representa como un conjunto de subsistemas para evaluar la confiabilidad (Mapa de diagnóstico). Los subsistemas que conforman el sistema de una LT, en el mapa de diagnóstico, son:

- Descargas atmosféricas
- Cimentaciones
- Estructura
- Contaminación
- Otros

La ocurrencia de una falla en cualquier subsistema puede provocar la interrupción de la energía eléctrica y convierte a la línea no apta para operar. A continuación, se describen los subsistemas considerados para el cálculo de la confiabilidad de las líneas de transmisión.

a) Descargas atmosféricas

Conjunto de evaluaciones referentes al estado del apartarrayos, cable de guarda, cable de puesta a tierra, etc. La buena condición de estos elementos es importante para mitigar las interrupciones de la línea de transmisión por una descarga atmosférica.

b) Cimentaciones

Los cimientos son los encargados de transmitir a tierra las cargas mecánicas de la torre y conductores. La buena condición de los cimientos, junto con los deslaves y protección contra impacto, garantiza que las cargas no causen algún movimiento que afecte la estabilidad de la torre.

c) Estructura

El propósito de la Estructura es llevar en la parte superior los conductores de las líneas aéreas y cables de guarda, con un adecuado libramiento del conductor. Por lo tanto, tener en buena condición su integridad es fundamental para mantener la continuidad del servicio eléctrico,

d) Contaminación

Los principales elementos, que determinan la condición de este subsistema, son los conductores y los aisladores.

- *Conductores*

La principal función de los conductores es transportar la corriente nominal manteniendo la temperatura límite de los conductores. El conductor más utilizado por las empresas de todo el mundo es el tipo ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced), en español significa Conductor de aluminio con acero reforzado.

e) Aisladores

Son utilizados para unir los conductores a los brazos transversales de las torres. Son el medio que separan las partes “vivas” de la línea con las partes puestas a tierra. Proporcionan un soporte mecánico a los conductores cuando se ven sometidos a condiciones fuertes de carga.

f) Otros

Este subsistema no afecta directamente el cálculo de la confiabilidad, y está más enfocado a la seguridad del personal que realiza los trabajos de mantenimiento

3.2 Componentes de los subsistemas

De acuerdo con el mapa de diagnóstico, los componentes de una torre de transmisión -tales como hilos de guarda, aisladores, conductores o apartarrayos- distribuyen en los diferentes subsistemas (descargas atmosféricas, cimentaciones,

estructuras, contaminación y otros). En total se tienen 25 componentes por torre agrupados en estos 5 subsistemas

Los 25 elementos, que integran una torre de transmisión en el mapa de condición, se enlistan a continuación. Para fines del desarrollo del presente trabajo de tesis, en la Tabla 4, a cada uno de ellos se les asigna una nomenclatura.

Tabla 4 Elementos que conforman una línea de transmisión.

| Nomenclatura | Elemento |
|---------------------|--|
| AB | ángulo de blindaje |
| ST | estado físico del sistema de tierras |
| EHG | empalmes para hilo de guarda |
| AP | condición de apartarrayos |
| CHCH | condición del hilo de guarda y/o CGFO y herrajes |
| BC | bocina de CGFO |
| CIM | cimentación |
| PCI | protección contra impacto |
| DES | deslaves |
| EST | condición física de la estructura |
| LC | libramientos del conductor |
| FA | aislamiento |
| CAA | contaminación ambiental en aislamiento |
| CEXA | contaminación por excremento en aislamiento |
| CHCH | condición del herraje del conductor |
| CHH | chavetas de herraje |
| CAMG | condición física del amortiguador |
| COND | conductor |
| CECN | condición de empalmes para el conductor |
| SEP | separadores |
| CE | cajas de empalme |
| BRE | brecha en derecho de vía |
| ACC | permiso de acceso |
| COM | cobertura de comunicación |
| NOMS | nomenclatura y señalización |

En el mapa de diagnóstico también se registran los tipos de falla, las que se clasifican como fallas ordinarias y fallas extraordinarias. La identificación de estos tipos de falla, por parte de CFE, Se muestra en las Tabla 5 y 6:

➤ ORDINARIAS

Tabla 5 Fallas ordinarias.

| Nomenclatura | Falla |
|---------------------|---------------------------|
| A0 | estructura |
| A1 | herrajes |
| A2 | aisladores |
| A3 | conductores |
| A4 | hilo de guarda |
| A5 | brecha |
| A6 | contaminación |
| B0 | descargas atmosféricas |
| C0 | vientos fuertes |
| C1 | quema de caña |
| C2 | quema de vegetación |
| D0 | desconocidas |

➤ EXTRAORDINARIAS

Tabla 6 Fallas extraordinarias.

| Nomenclatura | Falla |
|---------------------|----------------------|
| E0 | fallas de equipo |
| E1 | disturbio de sistema |
| E2 | extraordinarias |
| I | vandalismo |
| II | fenómenos naturales |
| III | accidentes |
| IV | otras |
| E3 | fallas técnicas |
| E4 | fallas de energía |

4 Marco teórico

4.1. Método basado en la condición para la determinación del índice de salud de activos en líneas de transmisión.

El método mostrado en [6], está basado en la condición permite el cálculo del índice de salud de una línea de transmisión considerando tres indicadores principales: aspectos estructurales, eléctricos y ambientales; cada uno con sus respectivos componentes. Figura 8

La técnica describe una política imparcial de mantenimiento, rehabilitación o reposición de los activos. Mediante la implementación del índice de salud (HI por sus siglas en inglés) se puede planear una forma de mantenimiento y establecer los requisitos necesarios para garantizar que el activo tenga el rendimiento requerido.

La Figura 8 también muestra una propuesta del proceso de determinación del índice de salud de las LTs.

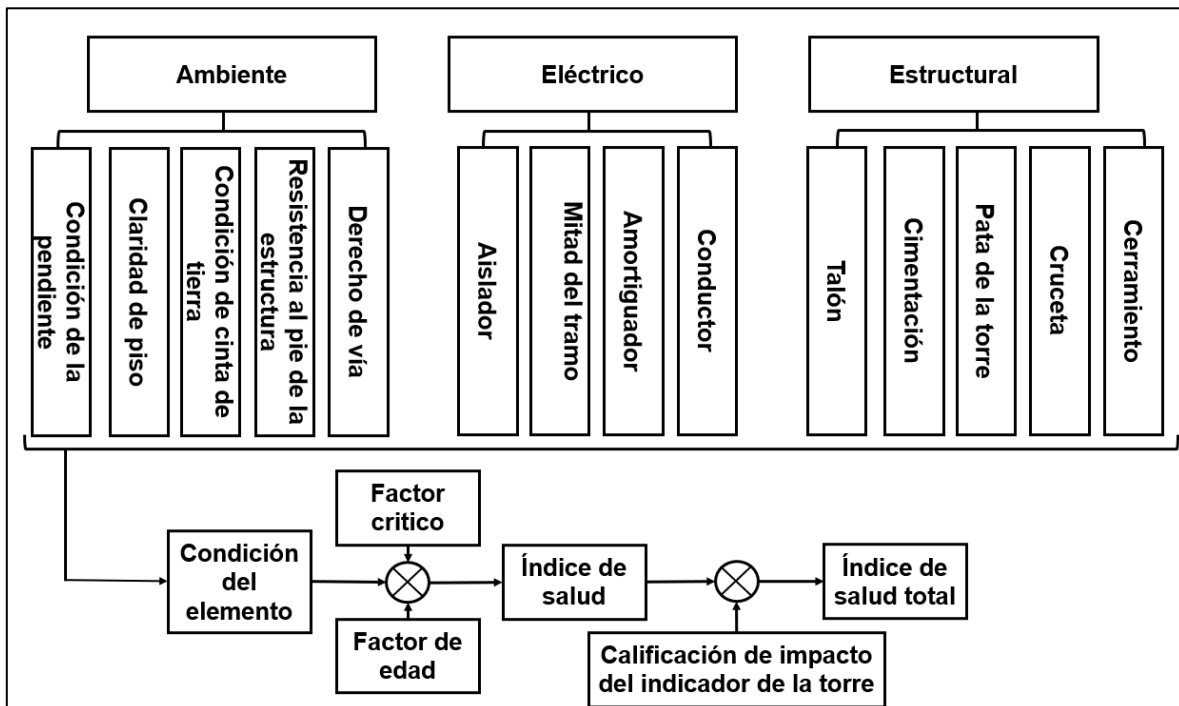


Figura 8 Propuesta del proceso para determinar el índice de salud en LTs.

Posteriormente se realiza la evaluación de cada componente en función de las puntuaciones de condición evaluadas y medidas.

Los datos históricos proporcionan información sobre la vida útil y así determinar el factor de edad. Para este trabajo se usó una base de datos históricos obtenida de Malasia peninsular. El factor crítico es un valor que establece la empresa eléctrica en relación con la frecuencia de aparición de disturbios o fallas en el servicio a lo

largo de un tramo específico de la línea. El valor establecido para una línea crítica es 0.5 y 1.0 para una línea no crítica.

El cálculo del índice de salud se formula según la Ecuación (2.0).

$$HI = \sum_{i=1}^m C_i \times I_i \times CF_i \times AF_i \quad \text{Ecuación 2.0}$$

Ecuación 2.0

donde

- I es la ponderación del indicador
- C es la ponderación del componente
- CF es el factor crítico
- AF es el factor de edad

El índice de salud total es la suma ponderada del porcentaje de cada indicador y se puede determinar usando la Ecuación 2.1.

$$THI = \frac{\sum_{j=1}^m HI_j \times m}{100} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde

- THI es el índice total de LTs
- HI es el índice de salud por indicador,
- M es la puntuación de la moda (debe ser total = 100%)
- n es el número total de componentes.

La Tabla 7 indica el rango del valor del índice de salud y su clasificación.

Tabla 7 Parámetros para la clasificación de la salud.

| índice de clasificación de la salud | |
|-------------------------------------|---------------|
| índice de salud | Clasificación |
| $75 \leq HI \leq 100$ | Muy bien |
| $50 \leq HI \leq 74$ | Bien |
| $20 \leq HI \leq 49$ | Pobre |
| $HI < 25$ | Muy pobre |

Sí el índice de condición es 100%, significa condición nueva y no necesita mantenimiento. Si el HI <25%, significa muy mal estado y necesita una acción inmediata.

El resultado del índice de condición muestra información al propietario de la línea sobre la gravedad del problema, si requiere reparación y/o mantenimiento, incluso si se debe programar el mantenimiento y estimar su costo.

Con base en esta investigación, queda de manifiesto que considerar el factor de impacto, el método de puntuación y la clasificación de la condición del activo es la mejor práctica. Desde esta investigación se puede realizar la valoración para mantenimiento, renovación o sustitución.

4.2 Proceso de Jerarquía Analítica

El Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) es una teoría general de medición. Se usa para derivar escalas de razón de comparaciones pareadas tanto discretas como continuas. Tiene sus aplicaciones más amplias en la toma de decisiones multicriterio, la planificación y la asignación de recursos y en resolución de conflictos

El AHP es un método que puede utilizarse para establecer medidas tanto en el dominios físicos y sociales.

La metodología tradicional del Proceso Analítico Jerárquico consiste en tres etapas: modelización, valoración y priorización.

Para modelar un problema mediante AHP, se necesita una estructura jerárquica o de red para representar el problema y comparaciones para establecer relaciones dentro de la estructura.

Estas comparaciones generan matrices de dominancia de los cuales se derivan escalas de razón en forma de vectores o funciones propios, según sea el caso. Estas matrices, o núcleos, son positivas y recíprocas, es decir, por ejemplo $E_{ij} = 1/a_{ji}$. Véase la Figura 9, para mejor ilustración.

| | | | |
|-------|------------|------------|----------|
| P | A_i | A_j | A_k |
| A_i | 1 | a_{ij} | a_{ik} |
| A_j | $1/a_{ij}$ | 1 | a_{jk} |
| A_k | $1/a_{ik}$ | $1/a_{jk}$ | 1 |

Figura 9 Matriz ilustrativa

Este método de decisión multicriterio que nos ayuda a seleccionar entre distintas alternativas en función de una serie de criterios o variables de selección, normalmente jerarquizadas, y que suelen entrar en conflicto entre sí. En general, un modelo jerárquico es: objetivo final, criterios y subcriterios que son subdivisiones de los criterios, si es que existen, y finalmente las alternativas de las cuales se va a hacer la selección. Figura 10.

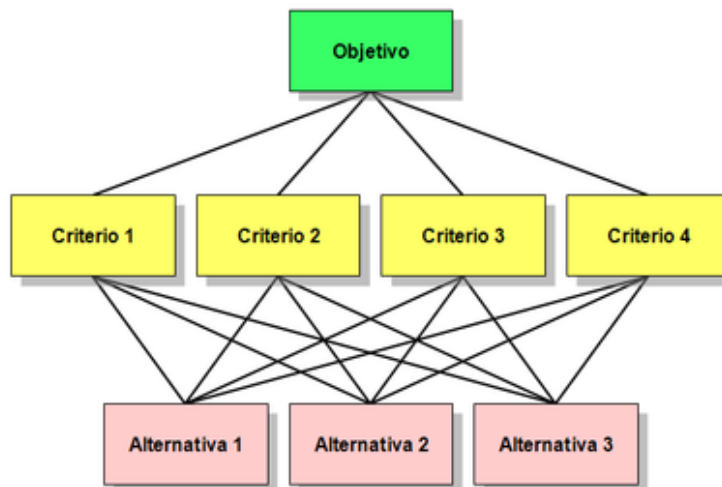


Figura 10 Modelo jerárquico general.

Para realizar la comparación pareada se utiliza la Escala Fundamental de Saaty [\[7\]](#), que se encuentra en la Tabla 8.

Tabla 8 Escala fundamental de Saaty.

| VALOR | DEFINICIÓN | COMENTARIOS |
|-----------|---|---|
| 1 | Igual importancia | El criterio A es igual de importante que el criterio B |
| 3 | Importancia moderada | La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B |
| 5 | Importancia grande | La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B |
| 7 | Importancia muy grande | El criterio A es mucho más importante que el B |
| 9 | Importancia extrema | La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda |
| 2,4,6 y 8 | Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar | |

Esta escala nos permite transformar aspectos cualitativos en cuantitativos, facilitando así la comparación entre las distintas alternativas y dando lugar a resultados más objetivos y confiables.

Primero se determina el peso de cada criterio o variable. Una vez se han definido los criterios, se realiza el análisis por pares, es decir, se comparan cada una de las alternativas frente a cada uno de los criterios par a par en cada uno de los niveles jerárquicos.

Una vez obtenidos estos, se comparan las distintas alternativas existentes para cada criterio. El resultado es la ponderación de las alternativas para cada una de las variables ponderadas previamente.

Después de haber realizado las comparaciones de todos los factores, la matriz resultante se normaliza, es decir, se divide cada término de la matriz sobre la suma de sus columnas, Con esta matriz, se obtiene el vector de prioridad del criterio al promediar los valores de las filas. Este procedimiento se repite para todos los criterios y también se realiza para comparar los criterios entre sí.

Para saber si los valores asignados en la matriz son correctos, se calcula el radio de consistencia, que evalúa la inconsistencia del decisor a la hora de emitir sus juicios. Cuando la medida de inconsistencia supera un determinado umbral de acuerdo con la medida propuesta por Saaty [7] para evaluar la inconsistencia representado por el radio de consistencia (CR) o el error de una matriz pareada, si es menor al 10% ($CR \leq 0,1$) la inconsistencia o error se considera aceptable.

Con cada vector de prioridad obtenido para los criterios, se forma una nueva matriz, llamada matriz de prioridad, al calcular el promedio de cada fila de la matriz se obtiene un vector denominado vector de prioridad de las alternativas, el cual se constituye en la solución del problema, al presentar cada una de las alternativas y un porcentaje de preferencia para cada una de ellas obteniendo así el Rankin definitivo de nuestras alternativas para la toma de decisión.

4.3 Redes recurrentes

4.3.1 Aprendizaje profundo

Según Haykin, S. [8] el objetivo de la inteligencia artificial es el desarrollo de paradigmas o algoritmos que requieren las máquinas para realizar tareas cognitivas, en las que los humanos somos mejores actualmente.

Según Géron [9]. El aprendizaje automático es un subcampo de la Inteligencia Artificial que busca “construir programas de computadora que mejoran automáticamente al adquirir experiencia”.

Esta definición indica que en un programa que se crea mediante aprendizaje automático no se necesita que el programador indique explícitamente las reglas que debe seguir para determinada tarea, sino que esta mejora automáticamente.

Con el paso del tiempo, investigadores se percataron que las técnicas convencionales de aprendizaje automático contaban con una limitada capacidad para procesar datos en su forma original y se requería mayor cuidado y experiencia en el tema para construir un sistema de aprendizaje que transformara los datos sin procesar en una representación adecuada o vector de características. A partir del cual el subsistema de aprendizaje, la mayoría de las veces un clasificador, podría detectar o clasificar patrones en la entrada.

Según Banafa [10] al profundizar en el aprendizaje automático, se encuentra el aprendizaje profundo, el cual su base son las *Redes Neuronales Artificiales*,

A diferencia de lo que ocurre con el aprendizaje automático, el aprendizaje profundo está menos sometido a supervisión. Implica la creación de redes neuronales a gran escala que permiten que el ordenador aprenda y “piense” por sí mismo sin necesidad de intervención humana directa.

4.3.2 Redes neuronales artificiales

Según Haykin, S. [8] Una red neuronal artificial es un procesador distribuido masivamente paralelo compuesto por unidades de procesamiento simple que tiene una propensión natural a almacenar conocimiento experiencial y ponerlo a disposición para su uso. Se parece al cerebro en dos aspectos:

1. La red adquiere el conocimiento de su entorno a través de un proceso de aprendizaje.

2. Las fuerzas de conexión entre neuronas, conocidas como pesos sinápticos, se utilizan para almacenar el conocimiento requerido.

Las unidades de procesamiento se organizan en capas y hay tres tipos de capas en una red neuronal:

Capa de entrada, donde están las unidades que representan los campos de entrada, Capas ocultas; y una capa de salida, con unidades que representan el campo o los campos de destino. Las unidades se conectan con fuerzas de conexión variables. Los datos de entrada se presentan en la primera capa, y los valores se propagan desde cada neurona hasta cada neurona de la capa siguiente. al final, se envía un resultado desde la capa de salida. Figura 11.

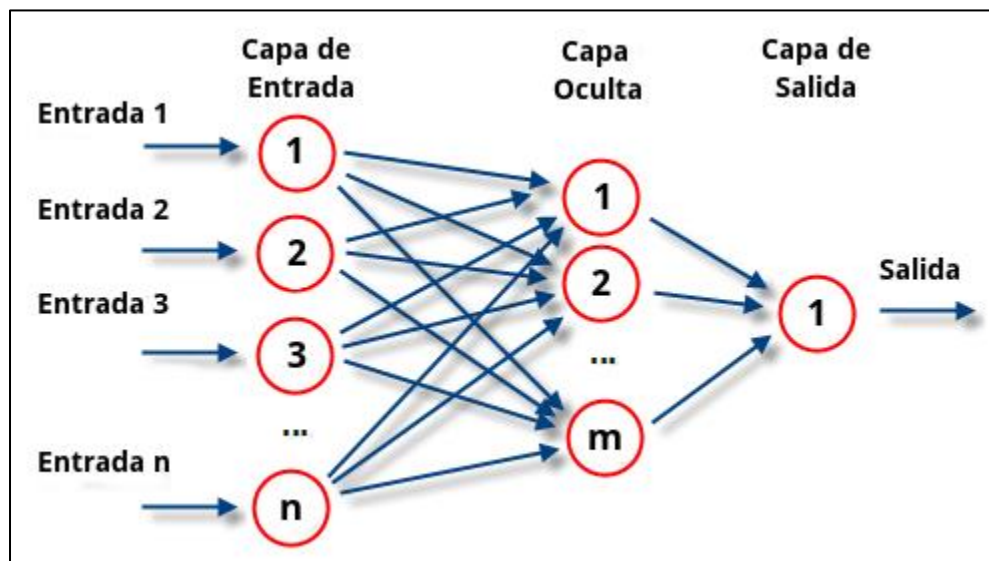


Figura 11 Estructura de una red neuronal artificial.

Un registro supone un conjunto de datos que mantienen una cierta vinculación entre sí y la red aprende examinando los registros de forma individual, generando una predicción para cada registro y realizando ajustes a las ponderaciones cuando realiza una predicción incorrecta. Este proceso se repite muchas veces hasta que mejore sus predicciones.

Al principio, todas las ponderaciones son aleatorias y las respuestas predichas resultan ser "incongruentes". La red aprende a través del entrenamiento. Continuamente se presentan a la red ejemplos para los que se conoce el resultado, y las respuestas que proporciona se comparan con los resultados conocidos. La información procedente de esta comparación se pasa hacia atrás a través de la red, cambiando las ponderaciones gradualmente. A medida que progresa el entrenamiento, la red se va haciendo cada vez más precisa en la replicación de resultados conocidos. Una vez entrenada, la red se puede aplicar a casos futuros en los que se desconoce el resultado.

Respecto a la topología de las redes neuronales se pueden tener dos grupos: Las redes multicapa de alimentación hacia adelante y las redes recurrentes. Las primeras son denominadas estáticas, pues producen una única salida para un conjunto de entrada, o sea, el estado de una red es independiente del estado anterior. Y las segundas las presentamos en la siguiente sección.

4.3.3 Redes LSTM

Las redes recurrentes son sistemas dinámicos también conocidos como redes espacio - temporales. El cálculo de una entrada, en un paso, depende del paso anterior y en algunos casos del paso futuro. Son un intento de establecer una correspondencia entre secuencias de entrada y de salida que no son más que patrones temporales.

Las tareas que se pueden realizar con este tipo de redes son:

- Reconocimiento de secuencias: Se produce un patrón de salida particular cuando se especifica una secuencia de entrada.
- Reproducción de secuencias: La red debe ser capaz de generar el resto de Una secuencia cuando ve parte de ella.
- Asociación temporal: En este caso una secuencia de salida particular se debe producir en respuesta a una secuencia de entrada específica.

Otra manera de clasificar las redes recurrentes es dependiendo del número de capas ocultas y la forma de realizar la retro propagación, que es una forma de entrenar una red neuronal. Son de tres tipos:

- Redes recurrentes simples
- Redes LSTM (Long Short Term Memory)
- Redes GRU (Gated Recurrent Unit)

Según un artículo del sitio Data Science [\[11\]](#), Las redes LSTM, cuentan con la conexión de la retroalimentación, que consiste en adaptar la red a la información "oculta" que tienen los datos que analiza para que aprenda.

La manera de procesar los datos es el mismo que el de las redes neuronales recurrentes estándar. Sin embargo, la operación de propagación de la información es diferente. Cuando la información pasa a través de ella, la operación decide qué información procesar más y qué información debe dejar ir. La operación principal

consiste en *células y puertas*. El estado celular funciona como una vía para transferir la información. Se puede considerar a las células como memoria.

Hay varias puertas en el proceso de LSTM. Cuando el estado celular lleva la información, estas puertas ayudan a que la nueva información fluya. Las puertas indicarán qué datos son útiles para guardar y qué datos no son útiles. Así que sólo los datos relevantes pasan a través de la cadena de secuencia para una fácil predicción.

Las partes esenciales de una red LSTM son:

Sigmoide

Existen unas puertas llamadas sigmoides, que contienen los valores 0 y 1, y su función es olvidar o mantener la información. Es decir, si la sigmoide tiene valor 1, los datos se multiplican por uno, el valor de esos datos sigue siendo el mismo. Sin embargo, si la sigmoide tiene valor 0, los datos se multiplican por cero, el valor se convierte en cero y desaparece.

Puerta del olvido

La función de esta puerta es decidir mantener u olvidar la información. La información que proviene de capas ocultas y aquella información que existe cuando la función sigmoide es 1, se mantiene y aquellos valores cercanos a cero desaparecen.

Puerta de entrada

Esta puerta actualiza el estado de las células. La información de la entrada actual y del estado previo pasa por la función sigmoide. Posteriormente, los datos también pasan por otra función más, que es la función tanh (tangente hiperbólica).

Estado de la célula

Para encontrar el nuevo estado de la célula es necesario sumar la salida de la puerta de entrada.

Puerta de salida

Para calcular el estado de salida, es necesario multiplicar la salida sigmoide por la salida tanh, es así como se puede predecir la siguiente información de un estado oculto. Ahora, el nuevo estado oculto y el nuevo estado celular viajarán al siguiente paso.

Clasificando las redes LSTM mediante sus arquitecturas se encuentran:

- Vanilla Modelo Univariado
- Stacked LSTM
- Bidirectional LSTM

El modelo univariado Vanilla LSTM tiene una arquitectura simple con una capa de entrada, una celda oculta LSTM y una capa de salida, este tipo de red se usa en problemas de predicción con secuencias cortas, una de las ventajas para la aplicación en series de tiempo se debe a que la predicción de secuencia está en función de los pasos de tiempo anteriores.

4.4 Aprendizaje bayesiano

4.4.1 Aprendizaje automático

El aprendizaje automático o machine Learning es la rama de la inteligencia artificial que permite a las computadoras “aprender” para así, imitar la inteligencia humana.

Consiste en crear algoritmos e identificar patrones después de una serie de ejemplos, para así crear lo que se conoce en humanos como memoria.

Estos algoritmos son los que originan el aprendizaje automático. Existen dos tipos principales de algoritmos de aprendizaje automático: el aprendizaje supervisado y el aprendizaje no supervisado.

La metodología para la construcción de modelos basados en aprendizaje automática es:

- Recopilación de datos. Se recopilan los datos “crudos” es decir, datos que aún no han recibido ningún tipo de procesamiento o modificación.
- Pre- procesamiento de datos. Se determina el formato requerido por el usuario para los datos y la respectiva aplicación de filtros para su procesamiento.
Una vez que los datos tienen el formato deseado por el usuario, iteran hasta que estén listos para ser procesados
- Aplicación de algoritmos de aprendizaje. Los datos obtenidos del paso anterior son sometidos a algoritmos de aprendizaje, como Redes bayesianas, Redes neuronales y procesos de decisión de Markov. Para este caso particular se sometieron a Redes bayesianas
- Los datos aprendidos quedan en un proceso de iteración hasta que el modelo obtenido sea el deseado, para este paso pueden realizarse diversas pruebas

en modelos y ver la relación entre un modelo y otro. La selección del modelo se puede determinar en base a la frecuencia con que un mismo modelo aparece.

- Modelo seleccionado. Después de seleccionar el modelo ganador se procede a las aplicaciones que el usuario desee, por ejemplo, análisis de datos, diagnóstico entre otros. Para este caso particular se aplican ambos

La figura 12 muestra el diagrama de proceso de esta metodología.

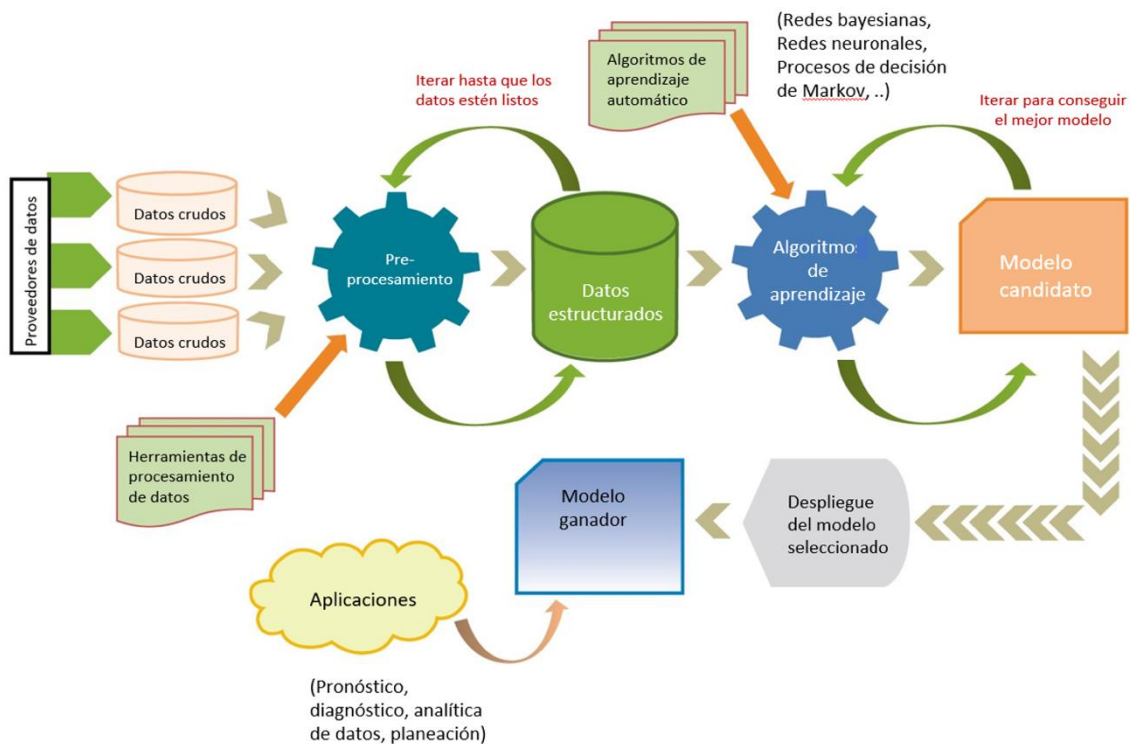


Figura 12 Metodología del aprendizaje automático.

4.4.2 Redes Bayesianas

Como se sabe, las redes bayesianas pertenecen al grupo de DAGs de sus siglas en inglés Directed Acyclic graphs, que son Modelos gráficos dirigidos, Son los grafos en los cuales los enlaces se encuentran dirigidos de una variable a otra, indicando, de esta forma, la existencia de entre ambas.

Estas representan un conjunto de variables y sus dependencias condicionales a través de un grafo acíclico dirigido

En un grafo dirigido, se define la relación padre-hijo cuando existe un enlace entre dos variables.

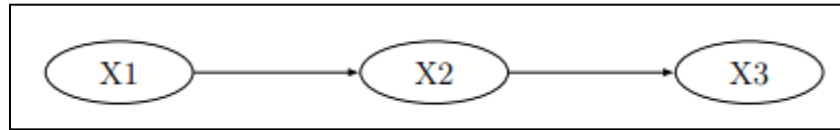


Figura 13 Ejemplo de red bayesiana.

En la figura 13 Se dice que X1 es el nodo padre de X2, que X2 es padre de X3 y, a su vez, que X3 es hijo de X2 y X2 hijo de X1.

En resumen, en una red bayesiana, los nodos representan variables aleatorias mismas pueden ser cantidades observables, variables latentes, parámetros desconocidos o hipótesis. Las aristas representan dependencias condicionales; los nodos que no se encuentran conectados representan variables las cuales son condicionalmente independientes de las otras. Cada nodo tiene asociado una función de probabilidad que toma como entrada un conjunto particular de valores de las variables padres del nodo y devuelve la probabilidad de la variable representada por el nodo.

Las redes bayesianas modelan un fenómeno a través de un conjunto de variables y sus relaciones de dependencia. Teniendo en cuenta este modelo, se puede hacer una inferencia de Bayesiana; es decir, estimar la probabilidad posterior de variables desconocidas en base a variables conocidas. Estos modelos se utilizan para clasificación, predicción, diagnóstico, etc. Además, proporcionan información sobre cómo se relacionan las variables del dominio, mismas que pueden interpretarse como relaciones de causa-efecto.

La cobija de Markov (manto de Markov, Markov Blanquet) de un nodo es el conjunto de nodos que lo hacen independiente del resto de la red. Para una RB, la cobija de Markov está formada por:

- Nodos padres.
- Nodos hijo.
- Otros padres de los hijos.

5 Evaluación de la condición en líneas de transmisión mediante técnicas de análisis de datos

Un primer producto de este trabajo es obtener el índice de condición a futuro utilizando el algoritmo para la determinación del índice de salud de la sección 4.1, y para lo cual se requiere determinar las ponderaciones de los subsistemas y componentes más representativas del sistema en estudio. Mediante un proceso jerárquico analítico (AHP), se determinarán tales ponderaciones. usando tres alternativas de ponderación para cada subsistema:

- Incidencia de fallas, Considerando datos estadísticos de reportes de incidencia de fallas anuales nacionales durante 10 años y los voltajes 69 kV a 400 kV.
- Tiempos de salida, considerando datos estadísticos de reportes anuales nacionales del tiempo fuera de servicio de una LT en caso de presencia de falla durante 10 años y los voltajes 69 kV a 400 kV.
- Mapa de diagnóstico (opinión de expertos). Ponderaciones sugeridas con base en la experiencia del personal operativa del área de transmisión.

Otro requerimiento para obtener el índice de condición a futuro es contar con una estimación futura de las evaluaciones de los componentes de la LT. Para obtener esta estimación, se utilizan evaluaciones actuales de los componentes, las cuales son ingresadas a un modelo de pronóstico basado en redes recurrentes tipo LSTM, previamente entrenado con datos históricos de evaluaciones pasadas. El modelo devuelve las evaluaciones de los elementos a futuro. En este trabajo se mostrará un ejemplo de pronóstico de la evaluación de un aislador sintético.

Un segundo producto de este trabajo es detectar fallas en un futuro. Para esto es necesario nuevamente utilizar las evaluaciones futuras de los elementos de la LT como se explicó en la sección anterior. Con estos datos se utilizaran para la determinación de la falla a futuro.

Además de esto, se requiere de un modelo de incidencia de fallas mediante redes bayesianas descritas en la sección 4.4, para lo cual es necesario la recopilación de información sobre evaluaciones históricas y fallas que se presentaron durante el periodo 2008-2016. Estos datos sirven para el entrenamiento de dicho modelo.

El diagrama a bloques que muestra la evaluación de la condición en líneas de transmisión mediante técnicas de análisis de datos se muestra en la figura 14.

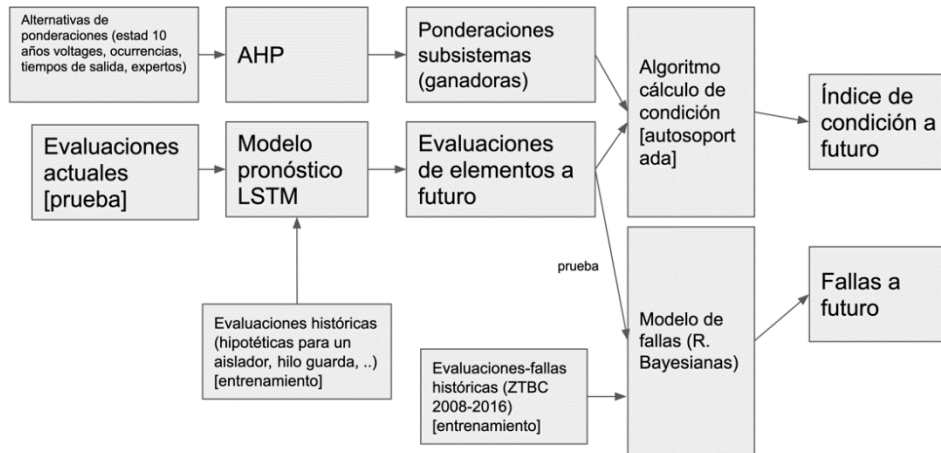


Figura 14 Diagrama a bloques de la evaluación de la condición en líneas de transmisión mediante análisis de datos.

5.1 Algoritmo de cálculo de la condición a futuro

5.1.1 Determinación de ponderaciones mediante estadística

Las ponderaciones de los subsistemas mediante estadística pueden estar basadas en la ocurrencia de fallas o en el tiempo de salida por falla.

La metodología para la determinación de ponderaciones mediante análisis estadístico es la siguiente:

Recopilación de los datos, es decir, se obtiene información histórica cuya fuente de procedencia sea confiable para aumentar la veracidad del análisis, la información debe contener las características necesarias para los intereses del usuario.

Procesamiento de datos. Una vez que los datos se encuentran concentrados, la información es agrupada por tipo de fallas y a su vez por *subsistemas*.

Posterior al procesamiento de la información se realiza un conteo exacto de los casos presentes en cada clasificación, y el conteo se denomina frecuencia absoluta acumulada y se denota por F_i

La frecuencia absoluta acumulada se divide entre el número total de casos presentes en los datos, N , se obtiene lo que se denomina la frecuencia relativa acumulada: n_i

Para conocer el porcentaje de cada grupo o clasificación se calcula la frecuencia porcentual acumulada, esto es multiplicando la frecuencia relativa acumulada por 100, $n_i \times 100\%$.

Para mayor comprensión del análisis, los valores de frecuencia porcentual acumulada se representan en algún tipo de gráfico que facilite la visualización.

La figura 15 muestra la metodología para la determinación de ponderaciones mediante análisis estadístico.



Figura 15 Metodología para la determinación de ponderaciones mediante análisis estadístico

5.1.1.1 Agrupación de fallas por subsistemas

Cada uno de los subsistemas se asocian a determinadas fallas.

Ejemplo descargas atmosféricas

Descargas atmosféricas se asocia a las fallas, B0, descargas atmosféricas y A4, Hilo de guarda.

Es decir que las fallas tipo B0 y A4, pertenecen a fallas por descargas atmosféricas. Véase la Tabla 9.

Tabla 9 Agrupación de fallas por subsistemas.

| Subsistemas | Fallas |
|-------------------------------|---|
| Descargas atmosféricas | B0: descargas atmosféricas A4: Hilo de guarda |
| Cimentaciones | C0: Vientos fuertes |
| Estructura | A0: estructuras |
| Contaminación | A1: Herrajes, A2: Aisladores, A3: Conductor, A6: contaminación |
| Trabajos de prevención | A5: Brecha, C1: Quema de caña, C2: Quema de vegetación, D0: Desconocidas |

5.1.2 Mapa de diagnóstico (opinión de expertos)

El mapa de diagnóstico es el conjunto de subsistemas, cada uno de ellos tiene un porcentaje de aportación para el cálculo de condición de una LT.

Las ponderaciones para cada subsistema son las siguientes:

- Descargas atmosféricas **35%**
- Cimentaciones **16%**
- Estructuras **13%**
- Contaminación **31%**
- Otros **8%**

A su vez, cada subsistema se conforma por un conjunto de evaluaciones de distintas variables, y cada variable posee también una ponderación de aportación. La suma ponderada de estas variables indica el valor de cada subsistema.

Una vez obtenido el valor de cada subsistema, se realiza una suma ponderada para todos los subsistemas para finalmente tener la condición de una LT.

5.2 Evaluación de elementos de la LT a futuro

La metodología para la evaluación de elementos de la LT a futuro es la siguiente:

Se lleva a cabo la recopilación de datos históricos de la condición de un elemento en específico de la LT. El estado del elemento corresponde a un valor estandarizado dependiendo de los posibles estados de condición que posee.

Los valores son guardados en forma de lista en una hoja de cálculo con formato CSV, separado por comas.

El procesamiento de los datos. Se lleva a cabo la aplicación de algoritmos de Redes neuronales recurrentes en este caso particular, se utiliza una red LSTM, Long Short Term Memory, cuya entrada al sistema serán los datos históricos del componente. Para mayores detalles sobre las redes recurrentes tipo LSTM ver la sección 4.3.

Se obtiene a la salida un valor, que corresponde al siguiente estado de condición predicho para el componente de estudio. Se corrobora que el error entre el valor conocido y el predicho sea menor, esto con la finalidad de que el sistema sea lo más exacto posible.

Ejemplo

La vida útil promedio de un aislador depende del grado de contaminación al que este es sometido, con fines demostrativos se considera un aislador sintético sometido a un grado de contaminación industrial y salina muy alto, con inspecciones realizadas cada 0.25 años, la vida útil promedio en este caso resulta ser de 0 a 5 años, obteniendo así, 32 registros. Con la finalidad de estimar la posible condición de dicho elemento y con ayuda de datos sintéticos, se aproximan los valores a una curva característica de la vida útil. Figura 16. Dicha grafica es con forma de pendiente negativa cuyos valores de condición van descendiendo a través del tiempo, es decir, al inicio del tiempo, la condición es excelente o muy buena, a medida que el tiempo transcurre, la condición disminuye.

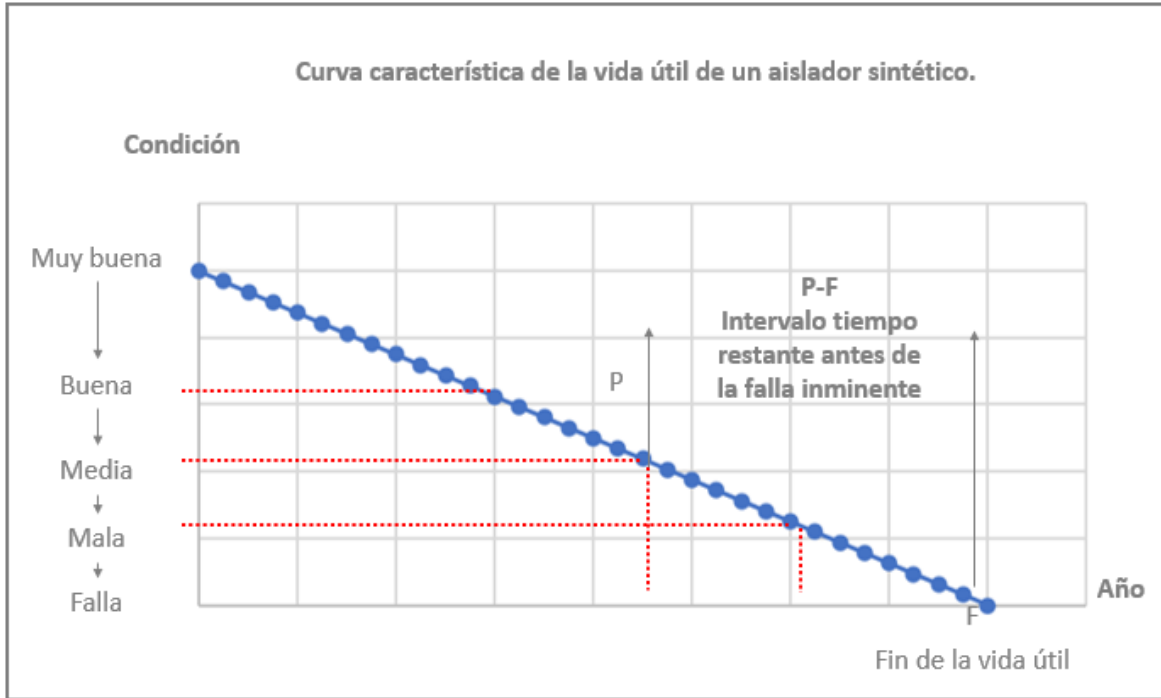


Figura 16 Grafica de degradación [1]

5.3 Estimación de fallas de elementos de la LT a futuro

5.3.1 Modelo de fallas

El modelo de fallas está basado en el método de aprendizaje bayesiano mostrado en la sección 4.4. Para el entrenamiento del modelo se usarán datos de registros de fallas que se presentaron a nivel de la Gerencia Regional de Transmisión Central, la cual se encuentra conformada por las Zonas: Poniente, Bajío, Centro, Estado de México, Sur, Puebla y Guerrero. La información fue extraída de los mapas de diagnóstico de las zonas mencionadas

Para la construcción del modelo de fallas no se considera la Zona de Puebla, debido a que el mapa de diagnóstico mostró una carencia de datos esenciales para procesamiento, por lo tanto, la aportación que tenían en el cálculo de índice de condición de la estructura era despreciable.

6 Resultados experimentales

6.1 Modelo de fallas

6.1.1 Selección de atributos

Una red Bayesiana permite conocer la relación causal que tienen entre sí los componentes de una LT. Por lo tanto, facilita inferir que variables tienen dependencias condicionales entre sí y cuáles no (en forma probabilística). De esta manera, el modelo permite excluir atributos no conectados causalmente y así reducir el espacio de variables del problema.

Para el entrenamiento del modelo, se registraron 9074 evaluaciones históricas correspondientes a los años 2004 a 2012 de los componentes las LT's de la Región de Transmisión Central (RTC) Zona Poniente, Bajío, Centro, Estado de México, Sur y Guerrero, en un archivo en formato CSV (comma separated values).

Para seleccionar el mejor modelo causal, se generaron 5 modelos alternativos con distintos conjuntos de datos. La red seleccionada se repitió en 2 de 5 pruebas realizadas, siendo las 3 redes restantes diferentes entre sí. La estructura seleccionada es la que se muestra en la Figura 17

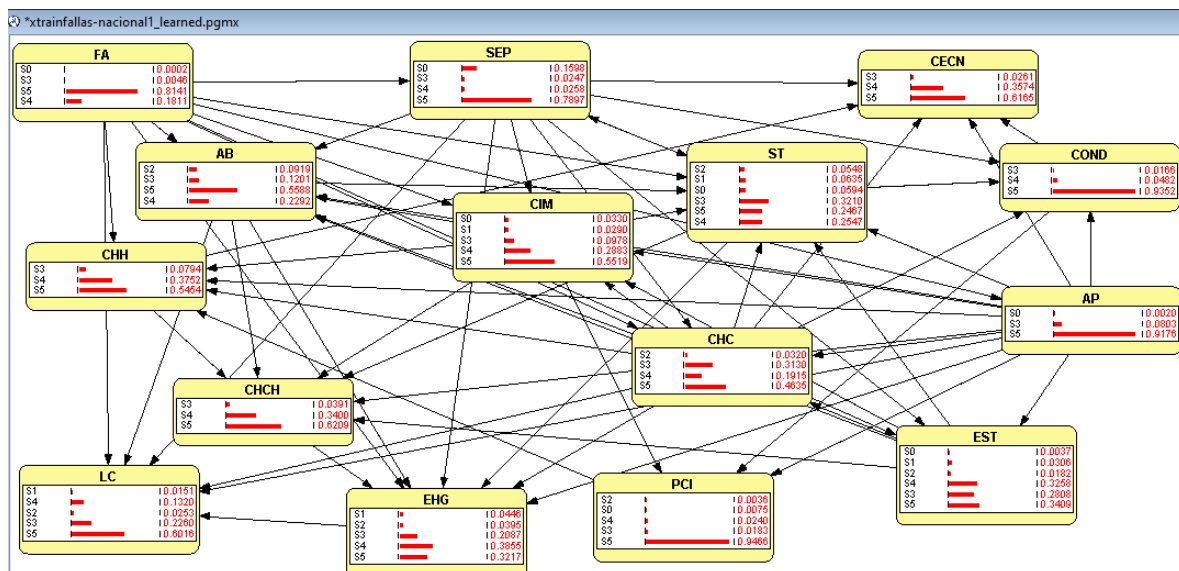


Figura 17 Estructura del modelo causal seleccionado.

En la Figura se muestran los atributos que tienen una dependencia condicional o relación causal con otros atributos del modelo. Por ejemplo, la variable “AB” depende de las variables “FA”, “SEP”, “CHC”, “EST”, “CIM” y “AP. Los atributos excluidos fueron: “PCI”, “CAA”, “CEXA”, “CAMG”, “CE”, “BRE”, “ACC”, “COM” Y “NOMS”.

Las variables eliminadas fueron:

BC Bobina de CGFO

DES Deslaves

CAA Contaminación ambiental en aislamiento

CEXA Contaminación por excremento en aislamiento

CAMG Condición física del amortiguador

CE Cajas de empalme

BRE Brecha en derecho de vía

ACC Permiso de acceso

COM Cobertura de comunicación

NOMS Nomenclatura y señalización

6.1.2 Modelo de fallas

Para determinar, mediante probabilidades, fallas en una LT, se construyó un modelo Bayesiano. Una ventaja con este tipo de modelos es que se puede estimar una falla aun con datos de inspección faltantes.

Con los registros anuales de las LT de la RTC, Zona Poniente, Bajío, Centro, Estado de México, Sur y Guerrero, de los años 2004 a 2012 se generó una base de datos con 9074 registros de la condición de 23 componentes y el tipo de falla asociado.

La base de datos resultante contuvo:

- 8717 estructuras que no presentan algún tipo de falla.
- 357 estructuras que presentan una falla.

Para evitar problemas de sobreajuste, el conjunto de datos más representativo se determinó a prueba y error. Debido a que el número de estructuras que no presentan

fallas era muy elevado, se decidió crear un conjunto de datos con 357 estructuras que presentan falla y 357 estructuras que no presenten fallas. Estas últimas seleccionadas aleatoriamente. Esta distribución de los datos mostro resultados poco aceptables, ya que el modelo aun así se sobre ajustaba. Finalmente se decidió considerar 180 registros de estructuras que no presentan falla más los 357 datos de estructuras que si presentan fallas.

Una vez seleccionado el conjunto de datos, éstos se organizaron en dos grandes partes, la que contiene la evaluación de los componentes, y la que que contiene el identificador de falla de cada estructura [T]. El conjunto es dividido, de manera aleatoria, en 5 subconjuntos de entrenamiento (80%) y prueba (20%) que posteriormente se archivaron en formato CSV.

Con los datos de entrenamiento y mediante el uso de la herramienta Open Markov, que realizaron cinco pruebas donde se obtuvieron cinco redes alternativas. La red seleccionada fue la que mostró el comportamiento más lógico posible, es decir, que se tuvieran casos donde la falla dependiera de la condición de las variables y no al contrario.

En la Figura 17 se muestra el modelo de fallas seleccionado. Nótese que la variable “Tipo falla” depende de las variables “SEP”, “CECN” y “AP”, se dice que estas variables son los padres de “TIPOFALLA” y por lo tanto que está sujeta a los valores que puedan tomar estas.

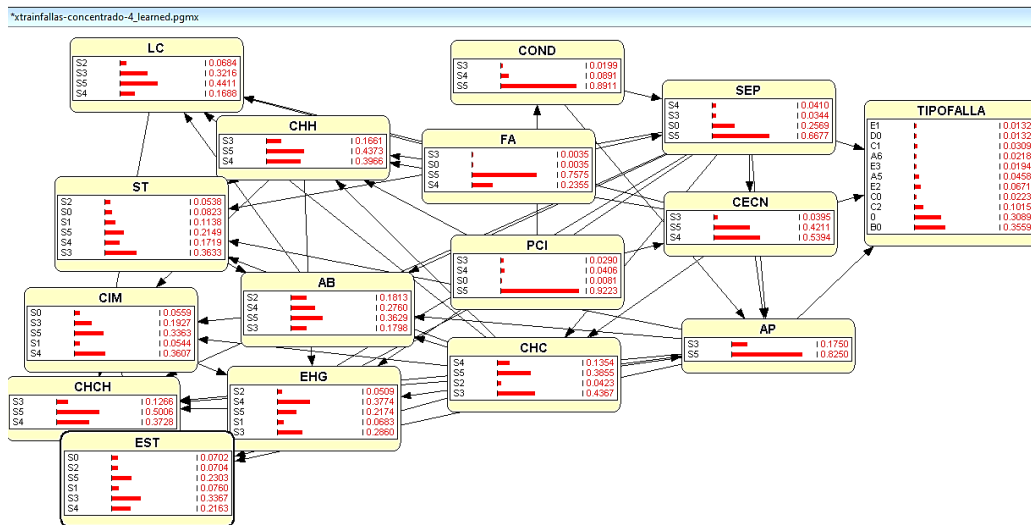


Figura 18 Modelo de fallas.

Con los datos de prueba, se estima la precisión del modelo, para determinar la calidad de este.

Tabla 10 Contabilidad de aciertos en el modelo.

| | Aciertos | No aciertos | Numero de registros |
|------------------------------|--------------------|-------------|---------------------|
| Primer más probable | 252 | 177 | 429 |
| Segundo más probable | 372 | 57 | 429 |
| Precisión del sistema | 0.867132867 | | |

Se considera acertado cuando el modelo y el conjunto de prueba coinciden con la misma falla con un porcentaje alto de ocurrencia (Primer más probable).

También se considera acertado cuando la falla que muestra el modelo es la segunda falla más probable y esta aparece en el conjunto de prueba (Segundo más probable).

La precisión se obtiene del cociente del número de aciertos para el segundo más probable entre el número total de registros, incluyendo aciertos y no aciertos.

Considerando 1 como la mayor precisión, el modelo muestra un valor de 0.86, o 86% de precisión, lo cual nos dice que el modelo no acertara en 14% de las veces.

6.2 Modelo de degradación mediante redes recurrentes

Para demostrar la efectividad y ventajas de los métodos de predicción de la condición basados en series de tiempo, se establecieron distintos escenarios de pronóstico para un aislador de hule silicón con alúmina T, bajo tres diferentes grados de contaminación industrial y salina.

Tabla 11. Vida útil de un aislador de hule silicón con alúmina T. En los tres casos de contaminación industrial y salina la distancia de fuga es de 39 mm/kV.

Tabla 11 Vida útil de un aislador de hule silicon con alúmina T.

| Aislador de hule silicon con alumina T | |
|---|---------------------|
| Grado de contaminación | Vida útil |
| Contaminación industrial y salina muy alta | 0 a 5 años |
| Contaminación industrial y salina media | 5 a 10 años |
| Contaminación industrial y salina ligera | 10 a 15 años |

Debido a la falta de datos iniciales para entrenamiento de los modelos, se generaron datos sintéticos con base en información de la Tabla 18. Esto es, se simuló el proceso de degradación para 3 aisladores sometidos a distintas condiciones ambientales. La idea es que, en el futuro, estos datos se vayan actualizando con datos históricos reales. Para la simulación, se asumió una frecuencia de inspección del componente de 1/8 de año, esto es 1.5 meses o 6 semanas, y con muestras recolectadas durante 4 años. Esto es, un total de 33 observaciones o número de inspecciones. La Figura 18 muestra una gráfica con los datos de condición del aislador durante 4 años.

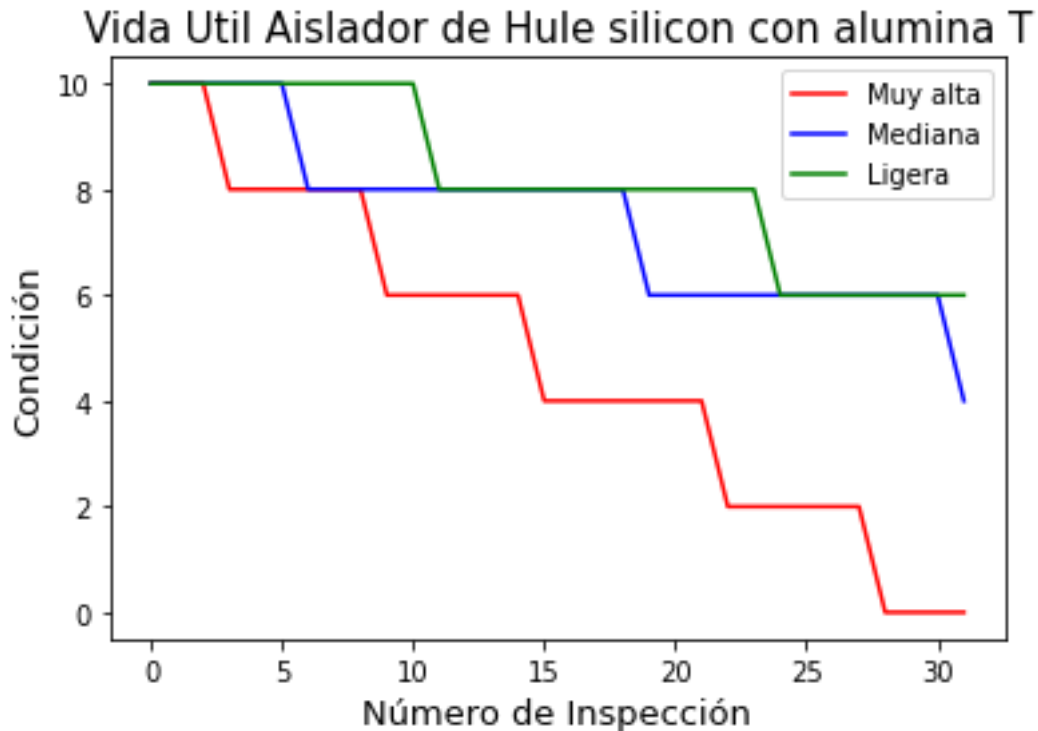


Figura 19 Registros de la condición de un aislador sintético.

Al inicio de las inspecciones, se considera que en los tres diferentes grados de contaminación el aislador se encuentra en excelentes condiciones (Condición=10), posteriormente con el transcurso del tiempo, el aislador se va degradando y por tanto disminuyendo su vida útil.

El conjunto de datos de 33 registros es dividido en conjuntos de entrenamiento (80%) y prueba (20%), esto es 26 y 6 registros para crear el modelo y para validar el modelo construido respectivamente.

Para el procesamiento de los datos y aprendizaje del modelo de degradación, el conjunto de datos de entrenamiento se usa para construir un modelo de predicción tipo LSTM (Long-Short Term Memory), que se implementó en Google Colaboratory.

El pronóstico se llevó a cabo utilizando una técnica de pronóstico univariado a un solo paso hacia delante. Para realizarlo se utilizó un modelo LSTM Vanilla, el cual tiene una sola capa oculta y una capa de salida. El modelo se construye con 5 observaciones de entrada y un valor de salida que corresponde al pronóstico.

En el esquema de la Figura 19. se muestra la topología de la red, la cual consta de tres capas:

Input Layer es la capa de entrada, misma que recibe 5 datos de entrada.

LSTM Layer es la única capa que contiene la unidad Long Short Term Memory, la cual recibe 5 datos de la capa de entrada y genera de 50 valores que enviará a la capa densa. Los 50 datos son parte de un parámetro dado por el ingeniero de aprendizaje.

Dense Layer es la capa de salida que recibe 50 datos y solo tiene un dato a la salida que es el valor del pronóstico.

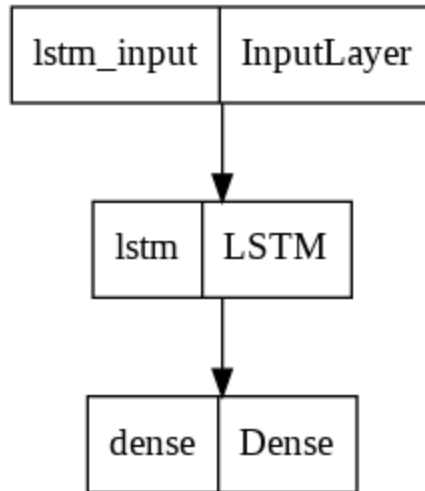


Figura 20 Topología de la Red LSTM pronostico a un solo paso.

El modelo de degradación se evalúa en términos del error absoluto medio porcentual (MAPE por sus siglas en inglés) mediante la fórmula de la Ecuación 3.

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\text{Valor real} - \text{Valor pronosticado}}{\text{Valor real}} \right| \quad \text{Ecuación 3}$$

Para el cálculo del MAPE es necesario contar con registros de datos verdaderos y valores pronosticados. Tabla 12.

Tabla 12 Cálculo del MAPE.

| Inspección | Valor real | Valor pronosticado | Error absoluto | Error porcentual absoluto |
|------------|------------|--------------------|----------------|---------------------------|
| 1 | 4 | 3.75 | 0.25 | 0.0625 |
| 2 | 6 | 5 | 1 | 0.16666667 |
| 3 | 4 | 3.3 | 0.7 | 0.175 |
| 4 | 2 | 1 | 1 | 0.5 |
| 5 | 2 | 2.8 | 0.8 | 0.4 |
| | | | Σ | 1.30416667 |

Se calcula el error absoluto, esto restando el valor pronosticado al valor verdadero. Cada valor obtenido es dividido entre el valor verdadero o real para tener así el error porcentual absoluto de cada registro.

La sumatoria de cada error porcentual absoluto es dividido entre "N" que es el número de registros, en este caso 5. Obteniendo así, el MAPE de 26% para el ejemplo de la Tabla 19.

El pronóstico se realizó para los tres grados de contaminación posibles para un aislador sintético que a continuación se describen.

6.2.1 Aislador sintético en contaminación industrial y salina muy alta

Los valores predichos mediante una red vanilla para un aislador bajo contaminación muy alta se muestran en la Figura 20. La línea color naranja corresponde a los datos reales y la línea azul corresponde a los valores predichos para todos los datos de prueba.

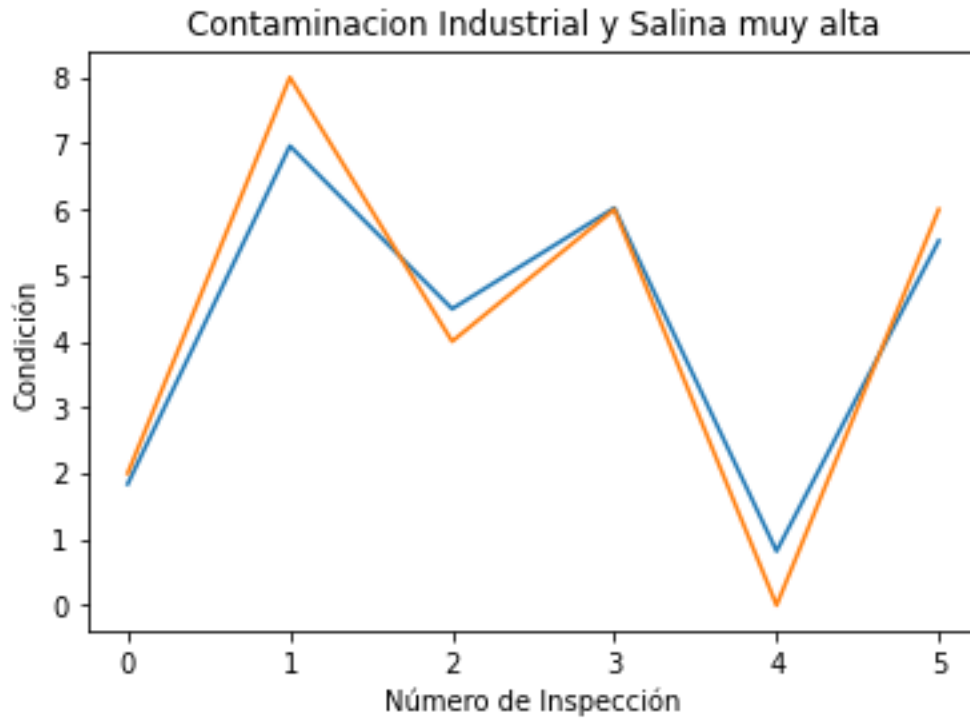


Figura 21 Valores predichos para la condición del aislador sintético.

La Figura 21 muestra la secuencia de 5 observaciones y el dato de salida para uno de los registros del conjunto de prueba. La cruz muestra el valor real y el punto verde el valor de la predicción un paso hacia adelante.



Figura 22 Datos pronosticados y los reales contra la secuencia que genero dichos valores.

Por ejemplo, para una secuencia de cinco inspecciones cuyos valores son 8,8,8,6 y 6, el valor pronosticado es 6 y el real es 6.

El error MAPE del modelo puede variar cada vez que el algoritmo se reinicia, por lo que se recomienda ejecutar el algoritmo varias veces para obtener un resultado promedio, el cual en este caso fue de 33.598.

6.2.2 Aislador sintético en contaminación industrial y salina media

Los valores predichos mediante una red vanilla para un aislador sometido a contaminación media se muestran en la Figura 22. La línea color naranja corresponde a los datos reales y la línea azul corresponde a los valores predichos.

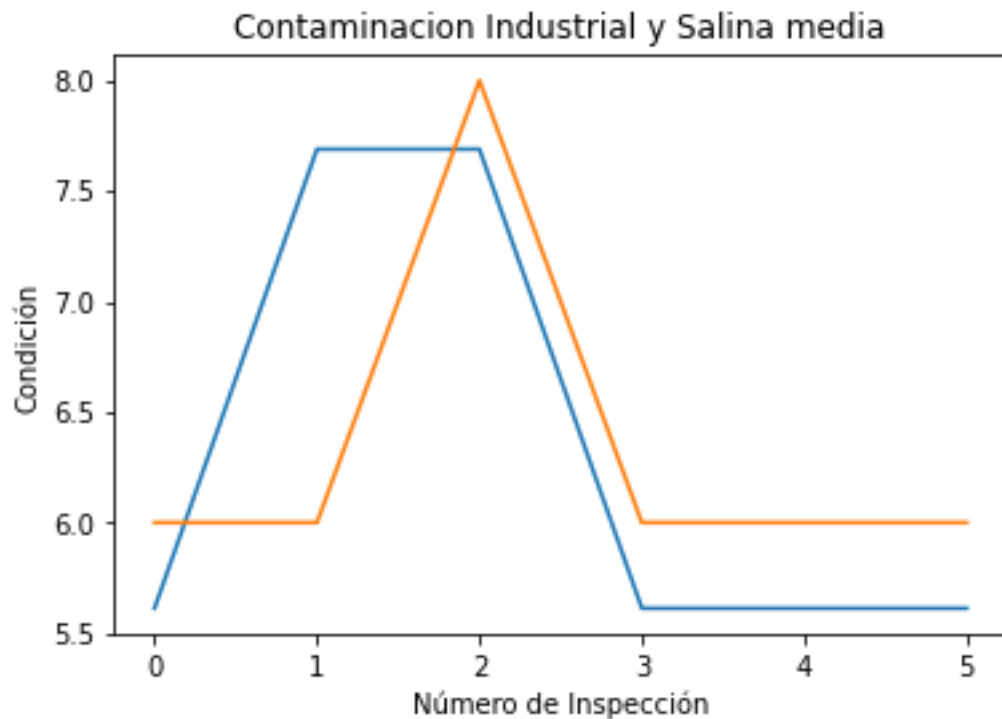


Figura 23 Valores predichos para la condición del aislador sintético.

La Figura 23. muestra la secuencia de 5 observaciones y el dato de salida para uno de los registros del conjunto de prueba del Aislador sintético en contaminación industrial y salina media.

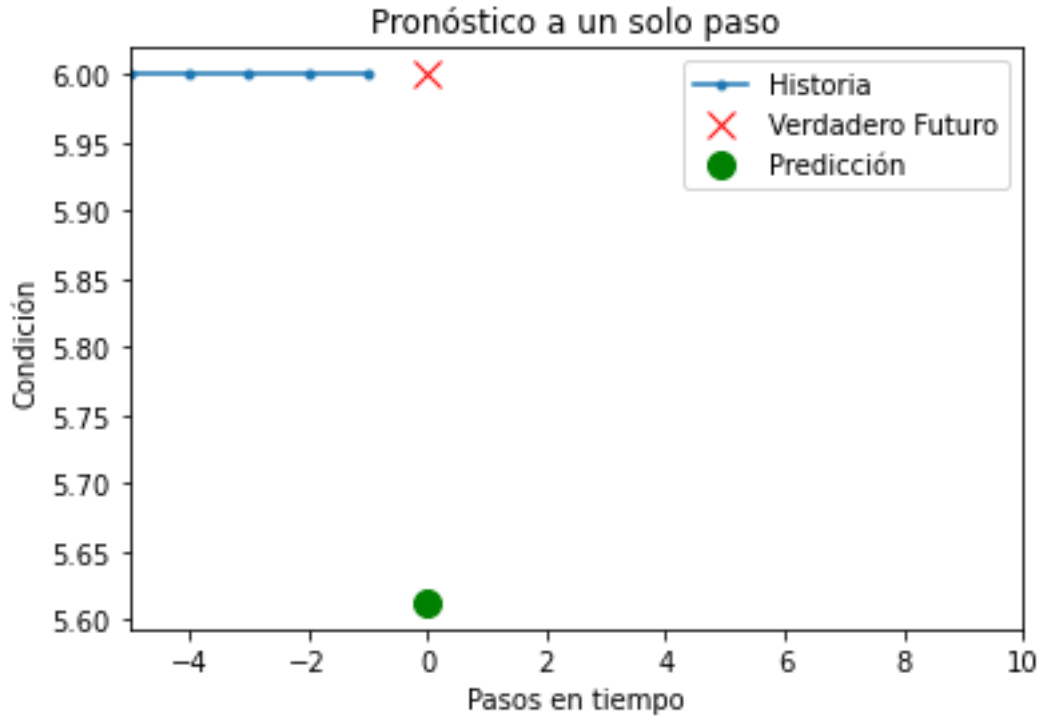


Figura 24 Datos pronosticados y los reales contra la secuencia que genero dichos valores. La cruz muestra el valor real y el punto verde el valor de la predicción un paso hacia adelante.

Por ejemplo, para una secuencia de cinco inspecciones cuyos valores son 6,6,6,6 y 6 el valor pronosticado es 5.60, mientras que el valor real es 6. Aquí, se puede decir, que el valor real comparado con el valor pronosticado, tienen una diferencia relativamente pequeña.

El error MAPE promedio del modelo fue de 7.24 %

6.2.3 Aislador sintético en contaminación industrial y salina ligera

Los valores predichos mediante una red vanilla para un aislador sintético sometido a contaminación ligera se muestran en la Figura 24.

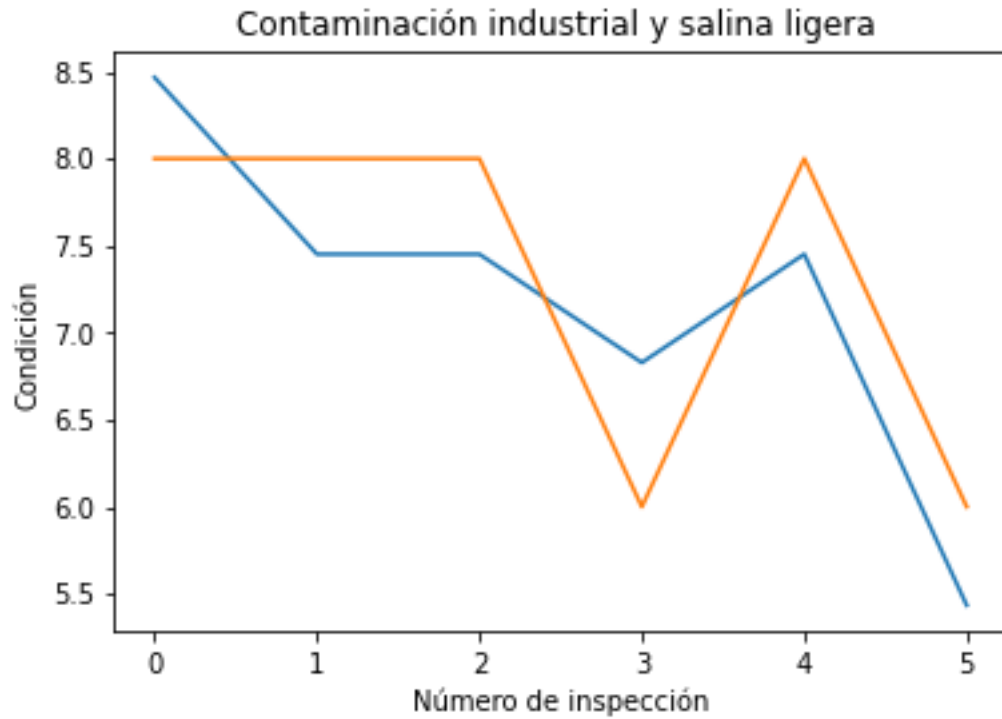


Figura 25 Valores predichos para la condición del aislador sintético. La línea color naranja corresponde a los datos de entrenamiento y la línea azul corresponde a los valores predichos.

La Figura 25 muestra la secuencia de 5 observaciones y el dato de salida para uno de los registros del conjunto de prueba. Por ejemplo, para una secuencia de cinco inspecciones cuyos valores son 10,10,10,8 y 8 el valor pronosticado es 8.50, mientras que el valor real es 8. Esto es, la diferencia entre el valor real y el valor pronosticado es relativamente pequeña.

La cruz muestra el valor real y el punto verde el valor de la predicción un paso hacia adelante.

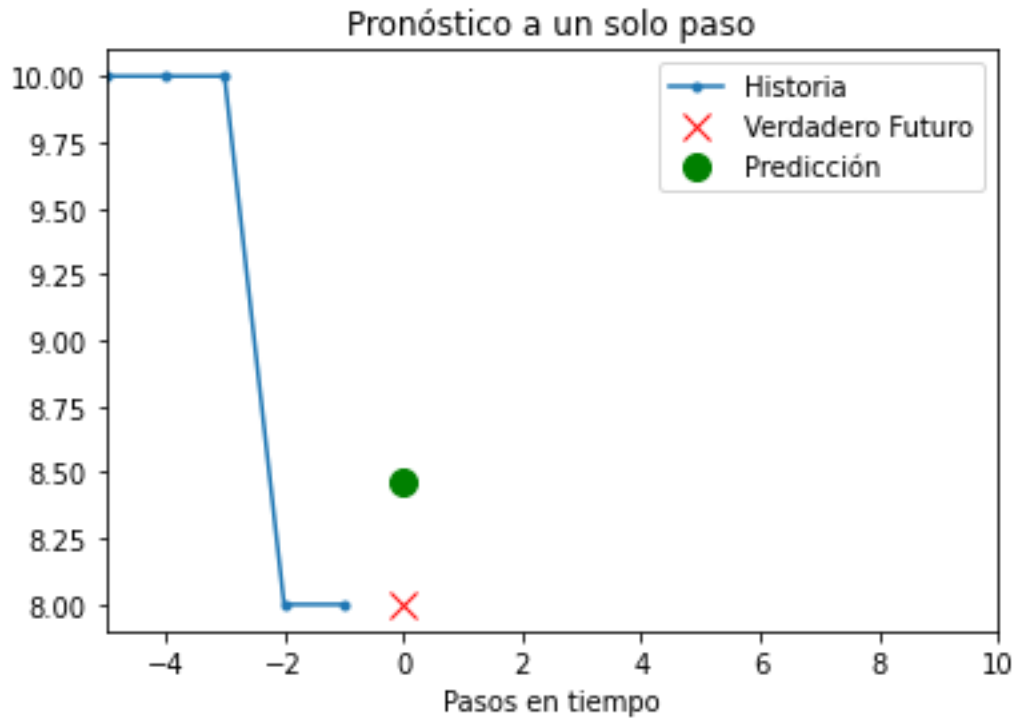


Figura 26 Datos pronosticados y los reales contra la secuencia que genero dichos valores.

El error MAPE promedio del modelo fue de 8.32%

A manera de resumen, la Tabla 13 muestra el error porcentual absoluto medio (MAPE) para cada escenario de prueba.

Tabla 13 Error porcentual absoluto medio para cada prueba realizada.

| Aislador de hule silicon con alumina T | |
|--|------|
| Grado de contaminación | MAPE |
| Contaminación industrial y salina muy alta | 34% |
| Contaminación industrial y salina media | 7% |
| Contaminación industrial y salina ligera | 8% |

6.3 Cálculo de índice de condición a futuro

6.3.1 Estadística de fallas

6.3.1.1 Estadística por ocurrencia de fallas

Ejemplo

La CFE proporcionó reportes anuales a nivel nacional de ocurrencia de fallas, los reportes corresponden a los años 2014, 2013, 2012, 2011, 2010, 2009, 2008, 2007, 2006, 2005 y 2004. Así como información de seis niveles de tensión, 400 kV, 230 kV, 161kV, 138 kV, 115 kV y 69 kV.

Tabla 14 Frecuencia porcentual acumulada de cada criterio.

| | |
|------------------------|-----|
| Descargas Atmosfericas | 54% |
| Cimentaciones | 4% |
| Estructura | 0.2 |
| Contaminación | 18% |
| Trabajos de prevención | 24% |

La representación gráfica de los porcentajes de cada falla se representa mediante grafica de pastel, Figura 26, para así facilitar el análisis.

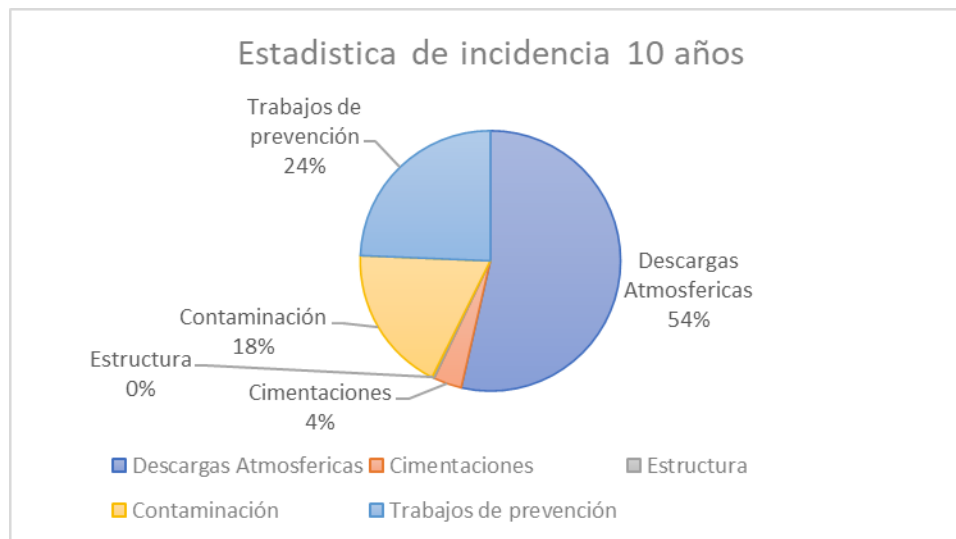


Figura 27 Representación gráfica de los porcentajes de ocurrencia de cada criterio.

Mediante a la representación gráfica de los resultados se observó que el subsistema con mayor ocurrencia de fallas es el de Descargas atmosféricas, el cual se posiciona en el primer lugar con mayor porcentaje de ocurrencia durante los años 2004 al 2014.

6.3.1.2 Estadística por tiempos de salida por falla

Ejemplo

La CFE proporcionó reportes anuales a nivel nacional de ocurrencia de fallas, los reportes corresponden a los años 2000, 2001, 2003, 2005, 2006, 2008, 2007, 2009 y 2012. Así como información de seis niveles de tensión, 400 kV, 230 kV, 161kV, 138 kV, 115 kV y 69 kV.

Tabla 15 Frecuencia porcentual acumulada de cada criterio.

| | |
|------------------------|-----|
| Descargas Atmosfericas | 13% |
| Cimentaciones | 14% |
| Estructura | 23% |
| Contaminación | 36% |
| Trabajos de prevención | 14% |

La representación gráfica de los porcentajes de cada falla se representa mediante grafica de pastel, Figura 27. para así facilitar el análisis.

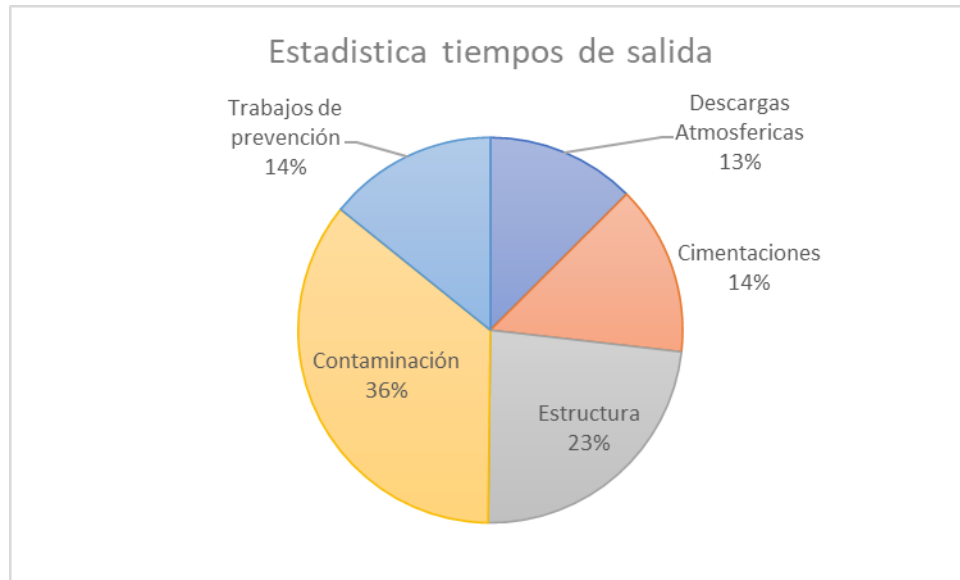


Figura 28 Representación gráfica de los porcentajes de tiempo de salida de cada criterio.

Mediante a la representación gráfica de los resultados se observó que la fallas que provoca que una línea este fuera de servicio son las fallas por contaminación con un 36%.

6.3.2 Selección de la mejor ponderación con Analytical Hierarchy Process

Ejemplo

La finalidad de este método es facilitar la selección de la mejor alternativa cuando existen más que provoquen algún conflicto.

Se determinan los criterios y alternativas con sus respectivos pesos, las alternativas son las posibles opciones que tenemos para solucionar una situación, de las cuales el método facilita elegir la que mejor se adapta a las necesidades del usuario y cumpla con todas las expectativas. Los criterios son los aspectos que se toman en cuenta para evaluar las alternativas. Véase la Tabla 16.

Tabla 16 Determinación de pesos.

| Nacional | | | | | |
|-----------------------|------------------------|---------------|------------|---------------|---------------------------------|
| | Descargas atmosféricas | Cimentaciones | Estructura | Contaminación | Trabajos de prevención (Brecha) |
| Estadística de fallas | 54 | 4 | 0 | 18 | 24 |
| Tiempo de salida | 13 | 14 | 21 | 37 | 15 |
| Mapa de diagnóstico | 33 | 15 | 12 | 30 | 10 |
| Media aritmética | 33 | 11 | 11 | 28 | 16 |

Los pesos de los criterios se determinaron por:

- Un análisis estadístico de ocurrencia de fallas que muestra la frecuencia acumulada porcentual de cada criterio.
- Un análisis estadístico de tiempos de salida por falla, igual que la ocurrencia de fallas, muestra cual criterio tarda mayor tiempo en solucionar una falla, es decir, que elemento se encuentra fuera de servicio debido a que una falla se presentó.
- Mapa de diagnóstico, que como se mencionó con anterioridad, corresponde a la importancia que la CFE le da a cada criterio para determinar la confiabilidad de una línea de transmisión.

El análisis se realiza de manera pareada, es decir, comparando dos partes a la vez, en este caso se procede a comparar los criterios, se ordenan de manera matricial, colocando los criterios como columnas y filas.

Se calcula la media aritmética de cada criterio, como se muestra en la Figura 13. Para la comparación de criterios y completar la primera matriz del método, se recurre a la Escala Fundamental de Saaty que se representa con la Tabla 8.

Para completar la matriz de comparación de alternativas se elige la importancia que tiene un criterio sobre otro tomando en cuenta la escala fundamental de Saaty. Se completa de la siguiente forma, la primera comparación es:

Descargas atmosféricas contra descargas atmosféricas

Es decir, considerando la media aritmética anteriormente calculada

33 respecto a 33, considerando la Escala fundamental de Saaty [7], se dice que la importancia es de valor 1, que corresponde a igual importancia, por ambos criterios tienen el mismo valor.

La siguiente comparación queda de la siguiente forma:

Descargas atmosféricas contra cimentaciones

Es decir, 33 contra 11, nuevamente se consideran los valores de la escala fundamental de Saaty [7], se dice que la importancia es de valor 7, corresponde a importancia muy grande, ya que el criterio A en este caso es 33 es mucho más importante que es criterio B que corresponde a 11.

Se continúa completando la matriz y finalmente calcular la suma total de cada criterio en la Tabla 17

Tabla 17 Matriz completa.

| | Descargas atmosféricas | Cimentaciones | Estructura | Contaminación | Trabajos de prevención (Brecha) |
|---------------------------------|------------------------|---------------|------------|---------------|---------------------------------|
| Descargas atmosféricas | 1 | 7 | 7 | 3 | 5 |
| Cimentaciones | 0.14 | 1 | 1 | 0.2 | 0.333333333 |
| Estructura | 0.142857143 | 1 | 1 | 0.2 | 0.333333333 |
| Contaminación | 0.333333333 | 5 | 5 | 1 | 5 |
| Trabajos de prevención (Brecha) | 0.2 | 3 | 3 | 0.2 | 1 |
| total | 1.819047619 | 17 | 17 | 4.6 | 11.66666667 |

A continuación, en la Tabla 18 se muestra la matriz de prioridades totales de alternativas. Se obtiene al dividir cada elemento de la matriz entre la suma total de cada criterio. Posteriormente, se calcula la media aritmética de cada columna, al que llamaremos vector de importancia.

Tabla 18 Matriz de prioridades.

| Matriz normalizada | | | | | Promedio |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| 0.5497382 | 0.4117647 | 0.4117647 | 0.6521739 | 0.4285714 | 0.4908026 |
| 0.078534 | 0.0588235 | 0.0588235 | 0.0434783 | 0.0285714 | 0.0536462 |
| 0.078534 | 0.0588235 | 0.0588235 | 0.0434783 | 0.0285714 | 0.0536462 |
| 0.1832461 | 0.2941176 | 0.2941176 | 0.2173913 | 0.4285714 | 0.2834888 |
| 0.1099476 | 0.1764706 | 0.1764706 | 0.0434783 | 0.0857143 | 0.1184163 |

Obtenidas las prioridades totales de las alternativas, el radio de consistencia muestra un valor de $CR= 0.084666321$, tomando en cuenta que $CR \leq 0,1$, se considera que es un valor aceptable.

Se realizó la comparación de las alternativas por cada criterio. obteniendo así cinco vectores de importancia. En la Tabla 19 se muestra la comparación de alternativas para el criterio 1.

Tabla 19 Comparación de alternativas. Criterio 1.

| Criterio 1: Descargas Atmosfericas | | | | | | | |
|------------------------------------|-------------|----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|--------------------|
| Alternativas | Estadística | Tiempo S | Mapa Diag | Matriz Normalizada | | | Ponderación |
| Estadística de fallas | 1 | 7 | 5 | 0.7446809 | 0.5384615 | 0.8064516 | 0.696531334 |
| Tiempo de salida | 0.1428571 | 1 | 0.2 | 0.106383 | 0.0769231 | 0.0322581 | 0.071854707 |
| Mapa de diagnostico | 0.2 | 5 | 1 | 0.1489362 | 0.3846154 | 0.1612903 | 0.231613959 |
| total | 1.3428571 | 13 | 6.2 | | | | |

Finalmente, para conocer cual alternativa se elige, los cinco vectores se ordenan creando una matriz denominada matriz de importancia, Tabla 20. La alternativa seleccionada es la que muestra un valor de importancia más alto respecto a las demás alternativas.

Tabla 20 Matriz de importancia.

| Alternativas | Descargas atmosfericas | Cimentaciones | Estructura | Contaminación | Trabajos de prevencion (Brecha) | Priorización |
|-----------------------|------------------------|---------------|-------------|---------------|---------------------------------|--------------------|
| Estadística de fallas | 0.696531334 | 0.063736264 | 0.055608369 | 0.089654307 | 0.63334572 | 0.307775199 |
| Tiempo de salida | 0.071854707 | 0.267399267 | 0.702025706 | 0.607001694 | 0.260497956 | 0.381755866 |
| Mapa de diagnostico | 0.231613959 | 0.668864469 | 0.242365925 | 0.303343999 | 0.106156324 | 0.310468935 |

En la Tabla 20, se presenta la matriz de comparación de los pesos obtenidos para cada alternativa mediante la técnica de multicriterio.

Según los resultados, se concluye que la alternativa que tiene información más robusta y confiable es la correspondiente al análisis estadístico de tiempos de salida de componentes.

6.3.3 Cálculo del índice de condición a futuro

De acuerdo con los resultados del AHP, las ponderaciones seleccionadas para el cálculo de a condición son las siguientes:

- Descargas atmosféricas 13%
- Cimentaciones 14%
- Estructura 21
- Contaminación 37%
- Trabajos de prevención (otros) 15%

Debido a que el subsistema de trabajos de prevención no afecta directamente el cálculo de la confiabilidad la ponderación y está más enfocado a la seguridad del personal que realiza los trabajos de mantenimiento su peso es distribuido entre los demás subsistemas con un ajuste de pesos, es decir, distribuyendo el 15% que le corresponde entre los demás subsistemas.

Considerando como 100% a la suma de porcentajes de cada subsistema y excluyendo el 15% de trabajos de prevención, el 85% restante ahora es considerado el 100% para el cálculo de la condición de la LT.

Mediante una relación de proporción directa son recalculadas las ponderaciones restantes. Tabla 21.

Tabla 21 Ponderaciones recalculadas por el ajuste de pesos

| Subsistema | Ponderación (%) | Nueva ponderación (%) |
|------------------------|------------------------|------------------------------|
| Descargas atmosféricas | 13 | 15.29411765 |
| Cimentaciones | 14 | 16.47058824 |
| Estructura | 21 | 24.70588235 |
| Contaminación | 37 | 43.52941176 |
| Σ | 85 | 100 |

En la Tabla 23, se muestran las nuevas ponderaciones a utilizar para el cálculo del índice de condición.

Asumiendo que se conoce la evaluación a futuro de al menos un componente de cada subsistema y una ponderación realista de cada subsistema es posible calcular el índice de condición a futuro.

Como ejemplo, para esta cálculo se usará un elemento representativo de cada subsistema. Es decir, para descargas atmosféricas se considera un apartarrayos para una línea de transmisión con una evaluación de 8, para cimentaciones una de tipo concreto con una evaluación de 6, para estructura metálica una evaluación de 8 y finalmente para contaminación se considera un aislador sintético con evaluación de 6.

Tabla 22 Cálculo del índice de condición.

| Subsistemas | Ponderación (P) (%) | Evaluación a futuro (E) | P*E |
|------------------------|---------------------|-------------------------|-------------|
| Descargas atmosféricas | 15 | 8 | 12.23529412 |
| Cimentaciones | 16 | 6 | 9.882352941 |
| Estructura | 25 | 8 | 19.76470588 |
| Contaminación | 44 | 6 | 26.11764706 |
| Índice de condición | | | 68% |

Usando la fórmula para cálculo de índice de condición el índice para este caso es: 68%, lo que significa que, en el futuro a cierto horizonte de tiempo, el índice de condición de la línea puede no ser el óptimo y que es preciso programar una revisión y mantenimiento de componentes, iniciando con los que tuvieron calificaciones mas bajas.

Conclusiones y trabajo futuro

Conclusiones

En este trabajo se presentó una alternativa para la determinación del índice de condición de una línea de transmisión basada en ciencia de datos e inteligencia artificial. Lo novedoso del método es que las ponderaciones de los subsistemas se determinaron con base en la evaluación de alternativas que consideraban i) análisis estadístico de datos reales y ii) la opinión de expertos. Otro aspecto novedoso es que el índice de condición se puede determinar a futuro con base en la evaluación de componentes a futuro, y para lo cual se puede hacer uso de técnicas de aprendizaje profundo. Utilizando datos históricos de fallas fue posible adicionalmente generar un modelo de diagnóstico, el cual al ser instanciado con datos futuros puede igualmente predecir fallas. Para obtener el índice de condición fue necesario analizar la vida útil de un elemento de la LT, en este caso fue un aislador sintético. Durante el análisis de dicho elemento, se llevaron a cabo una serie de pruebas para observar la vida útil y degradación del aislador. Los escenarios de prueba correspondían a tres grados diferentes de contaminación industrial y salina, con la información obtenida se generó un modelo de degradación se calculo el error porcentual de cada modelo sometido a un escenario de prueba diferente, el modelo correspondiente al nivel de contaminación industrial y salina mostró un elevado error porcentual comparado con los 2 escenarios restantes cuyo error porcentual fue casi 5 veces menor, concluimos que un ambiente donde la contaminación industrial y los niveles de sal son considerables o bajos la vida útil es más larga y útil, en comparación a niveles altos que es imposible dar un pronóstico acertado.

Trabajo futuro

Es importante identificar las líneas de investigación abiertas para dar continuidad al esfuerzo invertido. En esta sección se muestra el trabajo futuro que es necesario realizar para ampliar el conocimiento en el área de LT's y el cálculo de la condición.

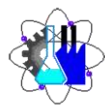
Durante el desarrollo de esta investigación han surgido líneas de trabajo futuro, las más relevantes se muestran a continuación:

- En esta investigación se obtuvo el modelo de degradación para un solo elemento, los aisladores sintéticos. La primera sugerencia para realizar es analizar mínimo un componente de cada subsistema de la LT y posteriormente obtener el modelo de degradación de cada uno.
- Una vez dada la continuidad a la primera sugerencia, calcular la condición de todos y cada uno de los elementos que conforman la LT, esto es posible mediante un modelo de diagnóstico que se genera mediante valores futuros de la condición de dicho elemento.

- Otra alternativa de trabajo futuro es, mediante el paso del tiempo y la información mencionada completa, es posible automatizar la forma de evaluar el estado del componente, permitiendo así, la optimización en costos de mantenimiento y una mayor eficacia en el desempeño de la función de cada elemento.

Bibliografía

- [1] Mohd Noor, Mohd Junaizee (2004) Application of knowledge-based fuzzy inference system on high voltage transmission line maintenance. Masters by Research thesis, Queensland University of Technology.
- [2] Menacho Ch, C. (2013, October 25). Modelos de regresión lineal con redes neuronales [Review of Modelos de regresión lineal con redes neuronales]. Dialnet.
- [3] Villada, F., Molina, J., & Velilla, E. (2009). Useful Life Model for Steel-Zinc Structures used in the Transmission of Electric Power in Colombia. Información tecnológica, 20(6). <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642009000600008>
- [4] Kutz M.; “ Handbook of Environmental Degradation of Materials” , 1–581, William Andrew Publishing, Norwich NY – USA (2005).
- [5] COLCIENCIAS/CREG, Impacto de la corrosividad atmosférica sobre la infraestructura del SEC y sobre los costos AOM, Proyecto de Investigación, Universidad de Antioquia, Grupo de Corrosión y Protección – Grupo de Manejo Eficiente de la Energía –GIMEL, Junio (2008).
- [6] Hashim, R.; Usman, F.; Baharuddin, INZ Determinación del índice de salud del activo de la línea de transmisión mediante el método basado en la condición. Recursos 2019 , 8 , 80. <https://doi.org/10.3390/resources8020080>
- [7] Sipahi y Mehpare, 2010; Berumen y Lamazares 2007, Rozman y Pažek, 2005, Saaty, 2001.
- [8] Haykin, S. (2001). Neural networks (2.a ed.). Pearson Education
- [9] A. Géron, Aprende Machine Learning con Scikit-Learn, Keras y TensorFlow, 2da ed. O’Reilly Media Inc., 2020
- [10] Banafa, A. (2016, 7 agosto). ¿Qué es el aprendizaje profundo? BBVA Open Mind. <https://www.bbvaopenmind.com/tecnologia/mundo-digital/que-es-el-aprendizaje-profundo/>
- [11] Introducción al concepto de LSTM. (2019). Data Science. <https://datascience.eu>



DR. LUIS CISNEROS VILLALOBOS
DR. RAFAEL CASTELLANOS BUSTAMANTE
DR. ALBERTO REYES BALLESTEROS
MTRO. JAVIER MACEDONIO ANDRES
ING. PEDRO FLORES SÁNCHEZ

P R E S E N T E

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de: **TESIS**

Titulado:

**EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN
MEDIANTE TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE DATOS**

Que presenta (el) o (la) **C. GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ KARLA JANNETH**, del programa educativo de **INGENIERÍA ELÉCTRICA-ELECTRÓNICA**.

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA

Se anexa firma electrónica

D I C T A M E N

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQeI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

| VOTO | NOMBRE | FIRMA |
|-------------|--|--------------|
| | DR. LUIS CISNEROS VILLALOBOS | |
| | DR. RAFAEL CASTELLANOS BUSTAMANTE | |
| | DR. ALBERTO REYES BALLESTEROS | |
| | MTRO. JAVIER MACEDONIO ANDRES | |
| | ING. PEDRO FLORES SÁNCHEZ | |

El voto del comité es aprobatorio, se anexan firmas electrónicas
VALH/fjbg



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2022-08-23 22:20:02 | Firmante

NyqayGVhHUEq8uhrhZI98CHjNWw8q29uBcTPH004xI1dT5Y3VvG6G1FMgRMpeQE7BanKerMx20rQNGiAylfjT6boLpl9sF4y7Li31mYBYs6kpyR/7WXYD+okgpytHeLCAQ3Ohec
sUxzHEvJTUbuNifmi6ewFhUXzgcqJv2wjfpyPg38P4OEnj+ZrwgogbJwXuGar+JoArru+kokRy24E1nGBY12y2HvOHSidhFaNLc26+2vH81YQxDiGNdgfUzNDryPuMnwMOVEMA4
LOYI1BfZ7kPwvcxbKvliwFnYADbb/ghhXVUbSqFB9vkFmdZFv4M/gXB2wZ66WEbedOfLr2gg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



J1ICRH9fr

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/rqP9uq9JAGT5I6V0T0mayEAjAzkvekIQ>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ALBERTO REYES BALLESTEROS | Fecha:2022-08-24 10:36:47 | Firmante

URe1xOEhxHuTH18s7NwOxHUj/oWU81hK2GUWpVjUHf2rVt6FDmDKERa5fo8l4vTeldgwkEjUYho0X4jEuu8scGcmeB0xSd+oKX9hrZsKDKYufdBfSEb/X4A11eqrkd7V7f3jge9a
uHS565u/BCQRzc+2PnAo53Epb1dHNHPW02WbZqubxUYA3egVDqc4Nz4tJmurIKSJLuNGxZ4h7u8u6ds+OgXYa1r6Emvl/kp76IT8Bg6NhwEJXZ8XXK5e8J4DWQFt9UziJOhnV
3WHoeBbe5QJohaqhj25hLEnNiWmGgjhG0K28CX5/ogCF+6/zi4v7R9gib79cUllJnucksWA==

LUIS CISNEROS VILLALOBOS | Fecha:2022-08-24 10:46:59 | Firmante

COxfiHL7xqwRqx2SbOebcRoWJ3VieZCTJJAAaXma2jVYfjo2PRzo64zyToQzHk0vn+JSkrPOtQhWamiMj+iz0+alVxI3RsFdJEA8JUA3aXKqzRNajQ+NhN786po8nSliK7iO3jbcCi
/qS9cusq5hAAIKjJEKXI5Nb868mutaL6etmQ7Z472lqopQAQv+f2oriXvMlejlo0J7oGhTxGON85e1HimZkkqWKGZm1s9AnvGVZ9HPnfKatSulWklD2aMSRPJMysfi/TJW3eROGcrF
SP/MVMruWe0B3Zl0inOf2V7cigGPbGWCjhBfcm1RmYouMg4E10ekon8rjNyzNvYg==

PEDRO FLORES SANCHEZ | Fecha:2022-08-24 12:32:25 | Firmante

TB//oZnkqMesCFKZbuq0UlvESISOTEABDGzlel+/yemNrfLGxB++Td9OdJKaz5Sy2CRwa/hUDIZv1dTs/Q54/aOOIEs6kKoBEdQXLJKPLkEnZU1BVasFp6giR5dmvgRPbHaKQ
BTIzfGa8ELsFFIGvxbte6ECd201lbPUwSiGRcal0/6c6xLXklW5b03kBlku9kjl7dByChBdvPT+MNUqFRT1+OjraXup+/ljX5FwiX7EYfM95Yyv4EYxApIEaV3d4ab9MdstKv7VFUgm6
kp0opBwA8tNeHsPltI5tumjBy1tDTnYVoMTobzT8Dnf17YMRIOxji7TF/VBnkRA==

JAVIER MACEDONIO ANDRES | Fecha:2022-08-30 20:11:26 | Firmante

kQGTAPYrmGhIJOFF1eVYqgPF9F5FksFBtDJRqir5tgJjCqzt0oMO8iJ5d68F/DBheml2C7RIYorKV5JqfrkRRTXOd8ZxmlfwCSS9kxGQWwPEi435zpXFCewDQ3r/iLaM8YZM4e+
paZyl3R5yNGuPxcPMTKjzQUgKzOTXqeU7qjkgATaU/YJ2rl+QmiOcr88929inpdG+GyiGNPCVAlgbVi6CxsS90em52TdQqJYfvR8LpPSaABHgVgehVOzrWtKGbfuM5kE1sgAlh
6OYrHzBZyPp1DtfEVRjrp/VfczIEqIsikdal6ga+zwei5xmx/n3NWFig7m+HKDEU1O9R7w==

RAFAEL CASTELLANOS BUSTAMANTE | Fecha:2022-09-05 13:11:56 | Firmante

gr71Lcy0Qydh16322w12wxO8asklwlzbg6l3x/4fcCUCjef3qNKMIuZHpyVW/LSS1S2ghBbeXpx0tXQUi8MyMyBELig+8UFTMRcNSTMAeMVLr9BbEIZE1QUyAn4hBPuxRO0mMBc
C7OMiEOnUGi98tCpzkSBdcZyH+wEckVjJ/LWwd6Edqf9Z7z3iV1qllu//fDMI7ocUi6EwlfwrP2zG60VKJhnQeCcopyS7TWfI9YzW2k/ao5XkpL0jPszFv2BPz5axRKPj+vhzho7qjim00l
SjybcJD37y0/yi5Nj2bcy8khBne53152tr2wmNmYJPnXx/842MH/4Amvwh3wVITw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



CKn12IW8

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/qynNknKIDct3Qd0iScNySYg7yCr9jmJQ>

