



CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“Dr. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ”

**Propuesta de un Método Supervisor del Sistema Catenaria-Pantógrafo del
Sistema Ferrocarrilero “General Ezequiel Zamora”.**

Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en

Electromecánica

Autor: Ing. Toro José Gregorio

Tutores: Dr. C. Luís Delfín Rojas Purón.

Dr. C. Daniel Guzmán del Río

Caracas, 2010

RESUMEN

Se propone un método para diagnosticar y predecir la captación de la energía eléctrica, en el contacto (Catenaria-Pantógrafo) de los ferrocarriles, con base en la adquisición y procesamiento de señales. En el mismo se ofrece un estudio del hilo de contacto y del frotador del Pantógrafo, así como los factores que influyen en la precisión de los sistemas de medida que utilizan las cámaras, teniendo en cuenta la transmisión y la recepción de las imágenes a distancia, sin obviar la interfase para la captura de estas en una computadora y la propuesta del software para procesarlas y analizarlas. Se propone un método que en tiempo real captura imágenes, genera patrones y realiza una visión computarizada del proceso, lo cual permitirá obtener información para luego poder diagnosticar y predecir las fallas o anomalías que se presentan durante el funcionamiento del dispositivo, lo que genera un sistema que servirá de base para realizar futuros mantenimientos, tanto preventivos como correctivos, necesarios para conservar en niveles apropiados la confiabilidad, el ahorro energético, los costos, y el tiempo de viaje.

ABSTRACT

The present work is orient to the study and proposal of a method to diagnose and predict the level of catchments of the electrical energy of the contact catenary-Pantógrafo of the railways, basing in the acquisition and processing of signals, In the same offers a study of the thread of contact and of the rubbing of Pantographic, Like this as the factors that influence in the accuracy of the systems of measure that use the cameras, having in account the transmission and the reception of the images to distance, without obviate the interfases for the capture of these in a computer, and the proposal of the software to process them and analyse them. The Author proposes a method that in real time captures images, generate patterns and realize a vision computerized of the process, the which will allow to obtain information for afterwards can diagnose and predict fail them or anomalies that present during the operation of the device, What generates a system that will serve of base to realize future maintenances, so much preventive like corrective, necessary for conserve in levels appropriates the reliability, the energetic saving, the costs, and the time of trip.

INDICE

INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO 1	9
MARCO TEÓRICO	9
1.1 Antecedentes y perspectivas de los ferrocarriles	9
1.1.1 Importancia y situación de los ferrocarriles a nivel mundial	9
1.1.2 La automatización de los procesos en los ferrocarriles	11
1.1.3 Expansión ferroviaria en Venezuela.....	13
1.2 Sistema de suministro eléctrico.....	14
1.2.1 Catenaria.....	15
1.2.2 El Pantógrafo.....	22
1.3 Desgaste en dos superficies en contacto	24
1.3.1 Dinámica del desgaste	26
1.3.2 Fallas en la captación de la energía eléctrica.....	27
1.3.3 Desgaste del frotador.....	32
1.3.4 La Chispa en la interacción Catenaria-Pantógrafo	37
1.4 Modelos para la representación de la Catenaria-Pantógrafo.....	38
1.5 Métodos que se emplean para la supervisión y control de catenarias:.....	39
1.6 Redes Neuronales Artificiales	39
1.6.1 Arquitectura de las redes neuronales artificiales	39
1.6.2 Factores que afectan al entrenamiento en las redes neuronales	42
1.6.3 Los parámetros de función de activación sigmoidea	43
1.6.4 Inicialización	47
1.6.5 Entrenamiento de las redes neuronales artificiales	48
1.6.6 Implementación de las redes neuronales	51
1.7 Generalidades sobre el diseño de sistemas catenaria – pantógrafo	53
1.8 Descripción de la Catenaria del sistema ferroviario “General Ezequiel Zamora”	54
Conclusiones parciales	54

CAPÍTULO 2	55
MODELACIÓN Y PROPUESTA DE SISTEMA DE SUPERVISIÓN	55
2.1 Evaluación del sistema ferroviario “General Ezequiel Zamora”	55
2.2 Propuesta de sistema de supervisión Catenaria-Pantógrafo	61
2.2.1 Supervisor Neuronal para el Sistema Catenaria-Pantógrafo.....	62
2.2.2 Sistema de diagnóstico desde los patrones	63
2.3 Valoración Social	65
2.4 Valoración Económica.....	66
2.5 Valoración ambiental.....	66
Conclusiones Parciales	67
CONCLUSIONES GENERALES	68
RECOMENDACIONES	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	70
ANEXOS	73

INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería ferroviaria, se presentan problemas relacionados con la captación de la energía eléctrica para la tracción en los ferrocarriles que utilizan el sistema de catenaria. Algunos de estos son: determinación de un buen contacto entre la Catenaria y el frotador del Pantógrafo; determinación de la fuerza que ejerce el Pantógrafo sobre la Catenaria; determinación de la altura del hilo conductor; determinación del contrapeso; determinación del calibre del hilo conductor; etc.

En los países de la región las políticas públicas aparecen como una necesidad para lograr la inserción esperada en la Sociedad de la Información. Para cerrar la brecha digital de hecho, los gobiernos en la Declaración de Florianópolis señalaban que era necesario tener presente que "dejar que sea conducida la evolución de la sociedad de la información y del conocimiento sólo por los mecanismos del mercado conlleva el riesgo de aumentar las brechas sociales al interior de nuestras sociedades, creando nuevas modalidades de exclusión, de expandir los aspectos negativos de la globalización y de incrementar la distancia entre los países desarrollados y en desarrollo"(David, 2001). El progreso de Venezuela y de las sociedades en general, no solo depende de sus recursos materiales o de la inversión de capital realizada, sino también de modo cada vez mayor, de la cantidad y calidad de los recursos humanos disponibles. En correspondencia con esto se encuentran los planes de nuestro gobierno revolucionario, de planificar y poner en práctica programas y acciones formativas destinadas a facilitar el acceso al conocimiento y a las nuevas tecnologías a amplios sectores de nuestra sociedad. Sin recursos humanos calificados en el uso de las tecnologías de la información y comunicación (TIC), no podrá existir y avanzar la sociedad de la información. Las revoluciones tecnológicas se despliegan en largos procesos de difusión porque implican la coevolución y la coadaptación de nuevas tecnologías, formas de organización, instituciones y patrones de consumo: "A la larga, suplantarse un arraigado régimen tecnoeconómico supone cambios profundos, cuya naturaleza revolucionaria se observa mejor en la amplitud y profundidad de los

aglomerados donde surge la innovación, que por el ritmo al cual logran ejercer su influencia. Precisamente por la amplitud y profundidad de los cambios que supone, la buena creación detallada de una nueva tecnología de 'uso general' requiere generar y coordinar múltiples elementos tangibles e intangibles, complementarios entre sí: nuevos equipos y planta física, nuevos tipos de técnicas laborales, nuevas formas de organización, nuevas formas de propiedad legal, nuevas estructuras reglamentarias, nuevos hábitos de pensamiento y comportamientos en cuanto a gustos." (David, 2001)

Por esta razón actualmente se lleva a cabo en Venezuela un plan ferroviario a corto, mediano y largo plazo para que nuestra sociedad se vea comprometida y favorecida con las bondades de estos sistemas. Entre estas bondades podemos destacar la masiva movilización de recursos humanos, la desconcentración poblacional e industrial de la ciudad, el transporte de mercancías entre las diferentes ciudades con un costo bastante bajo y la utilización de electricidad en lugar de combustible fósil. Esto trae como consecuencia menos daño al medio ambiente. Una vez que el sistema sea más confiable, más y más usuarios se unirán a este, y verán las grandes ventajas de desplazarse con este medio, por lo cual ya no tendrán necesidad de utilizar el vehículo particular, se unirán las ciudades en todos los niveles culturales y económicos, se unirán industrias, formas y modos de producción, aumentara la productividad en las empresas. Todo esto se logrará siempre que se garantice una confiabilidad en el sistema y la mejor forma de garantizar esta, es con un sistema automatizado que garantice menos interrupciones en el servicio ferroviario.

En el sistema ferroviario "General Ezequiel Zamora" ubicado en Los Valles del Tuy, tanto el hilo conductor como el frotador del Pantógrafo presentan unos niveles de desgaste muy altos. Para verificar y determinar estos, la gerencia de mantenimiento, decide en algunos momentos detener el ferrocarril y pasarlo a talleres, para determinar el desgaste en el frotador del Pantógrafo, e interrumpe el tráfico ferroviario, para verificar el estado de la Catenaria.

Lo anterior permite enunciar como **situación problemática**, la necesidad de interrumpir periódicamente el tráfico del sistema ferroviario "General Ezequiel

Zamora” ubicado en Los Valles del Tuy, para diagnosticar en taller el estado del contacto catenaria – pantógrafo.

El **problema científico** que se abordara en esta tesis es la ausencia de un método para la supervisión eficaz de la captación de energía eléctrica en el contacto Catenaria-Pantógrafo, bajo las condiciones de explotación del Sistema ferroviario “General Ezequiel Zamora” ubicado en Los Valles del Tuy.

El **objetivo** es proponer un método supervisor y predictivo, que monitoree y analice la captación de la energía eléctrica, en el contacto Catenaria - Pantógrafo, para la explotación segura del sistema ferroviario “General Ezequiel Zamora” en su tramo Caracas, Los Valles del Tuy.

La idea está relacionada con un programa o software que procesa imágenes del hilo de contacto y del frotador del Pantógrafo, en función de las variables de explotación.

Hipótesis:

Con la caracterización adecuada de las variables que influyen en la captación de la energía eléctrica en el contacto Catenaria - Pantógrafo, bajo las condiciones de explotación del sistema ferrocarrilero “General Ezequiel Zamora”, ubicado en Los Valles del Tuy, con la utilización de Redes Neuronales como herramienta, se puede diseñar un método predictivo.

El **objeto de estudio** es el sistema de captación de energía eléctrica en el contacto Catenaria-Pantógrafo,

El **campo de acción** de esta investigación es el monitoreo y supervisión del contacto Catenaria-Pantógrafo al captar la energía eléctrica, en el ferrocarril del sistema ferroviario “General Ezequiel Zamora” ubicado en los valles del Tuy.

Tareas:

- Establecer el marco teórico de la investigación.
- Modelar y simular el contacto catenaria - pantógrafo.
- Diseñar un programa supervisor del contacto Catenaria-Pantógrafo.

Tipo de investigación:

Según el alcance es una investigación de desarrollo, ya que se pretende generar una propuesta de un método para la supervisión del contacto Catenaria-Pantógrafo. Es una investigación cuantitativa y cualitativa ya que su estudio se centra en observaciones cuantificables y se utilizan patrones visuales para el procesamiento de la información.

Factibilidad: su factibilidad para la implementación queda demostrada debido a que los costos de los equipos en su totalidad son de 5000 (cinco mil bolívars fuertes), y en el software desarrollado en Matlab, las bases para el montaje de las cámaras suman unos 2000 (dos mil Bolívars), por lo tanto el proyecto tendrá un costo de 7000 (siete mil bolívars), a la fecha del 01 de Marzo del 2010, y los resultados se muestran y analizan, en el capítulo 3.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

El objetivo de este capítulo, es presentar el marco teórico - metodológico de la investigación. En este se analiza la importancia de los ferrocarriles a nivel mundial y en Venezuela, la automatización de los mismos, constitución del sistema nacional ferrocarrilero, la expansión y la proyección, el suministro eléctrico, características de la Catenaria y del Pantógrafo. Se describen las posibles causas de fallas en la captación de la corriente y se presentan los modelos simplificados que representan la Catenaria como un sistema de masa y rigidez variable.

1.1 Antecedentes y perspectivas de los ferrocarriles

1.1.1 Importancia y situación de los ferrocarriles a nivel mundial

Son numerosos los ejemplos en la historia en que los ferrocarriles cambiaron profundamente su entorno y propiciaron el desarrollo de regiones alejadas de la metrópoli e integraron el territorio. El oeste norteamericano recibió por ferrocarril todos los males del racismo, la explotación, y el genocidio de muchos grupos indígenas, pero debe admitirse que también integro un territorio que había sido imposible de unificar. Imaginemos el enorme territorio ruso integrado a lomo de bestia y no a través de una vasta red ferroviaria, incluso en Europa comunitaria en proceso de acercamiento político, social, económico, en camino a construir una nación de diversidades culturales, seria una quimera a no ser porque la unidad comenzó sobre rieles, haciendo permeables fronteras ante rígidas e infranqueables. Si se planifica el impacto de las líneas férreas se acerca a la gente, dentro y fuera de las naciones. Los mercados: productores, transformadores y consumidores, crean nuevos centros poblados, y desconcentran las grandes ciudades. Los trenes de gran velocidad, son los más ligeros del mundo si se miden por la relación peso total/número de asientos, se siguen revisando, para encontrar nuevas formas de reducir la carga sobre las vías. Los transformadores, que tienen la misión de suministrar

los diferentes niveles de voltajes y frecuencias necesarios para los motores, están entre las partes más pesadas del tren. La construcción de transformadores con láminas de aluminio y de acero aleado con cobalto en lugar de hilos de cobre, ha permitido no hace mucho reducir su peso de 11 toneladas a 7,5. La importancia de estos trenes es que acercan distancias entre ciudades que se consideran dormitorios, permiten transportar gran cantidad de personas en el menor tiempo posible y con una alta seguridad y no podemos dejar de señalar el menor impacto ambiental, y un sustancial ahorro energético. (Bruno,1982)

El desarrollo tecnológico ha conducido a que en la actualidad la fuente de energía propulsora de los ferrocarriles, en muchos casos, sea la electricidad; lo que ha conducido a que uno de los problemas técnicos que ha sido necesario resolver, es el relacionado con los tipos y la calidad de los contactos que garantizan la continuidad del circuito de alimentación de energía a los sistemas motrices. Para ello se utiliza el sistema Catenaria-Pantógrafo, que se diseñan en función de la velocidad máxima que puedan alcanzar los ferrocarriles. Y las variables de explotación van a definir la durabilidad y confiabilidad del sistema. Actualmente se trabaja con el criterio de ahorro energético por lo que los sistemas deben funcionar con un nivel mínimo de energía sin alterar su funcionalidad. A medida que avanza la ciencia y la tecnología, se implementan en los nuevos ferrocarriles, sistemas automáticos e inteligentes, que actúan conjuntamente para lograr un ahorro energético. Las marcadas diferencias entre los conceptos ferroviarios de Europa y de los Estados Unidos encuentran su expresión en la selección del tipo de tracción para ferrocarriles. El uso casi exclusivo de la tracción diesel en un lado, y el fuerte uso de la tracción eléctrica en el otro, se fundamenta sobre argumentos claros y absolutamente razonables el peso de los ferrocarriles y la densidad del tráfico. (Benito, 2004).

Hoy, gracias a la informática, se puede controlar y localizar a distancia un ferrocarril, así como realizar conexiones automáticas de ferrocarriles, procesando instantáneamente datos sobre velocidad, circulación y otros, y transmitiéndolos. Un centro de control de tráfico cubre una zona amplia; al introducir el código de un ferrocarril en la unidad de control de tráfico, se

muestra su situación en la línea de modo automático, y las computadoras indican a los controladores la mejor forma de corregir el horario, en la hipótesis de que alguno esté fuera de su plan de ruta.

1.1.2 La automatización de los procesos en los ferrocarriles

La automatización lleva años extendiéndose en todos los campos y ha logrado muchos éxitos. Ejemplo de ello puede ser, en el diagnóstico médico, en la recepción remota, en el guiado de vehículos móviles, en la gestión de la información, en los procesos de señalización, en la robótica; entre otros. La ventaja que presentan los procesos automatizados respecto a la inspección humana es su simplicidad, alta velocidad de procesamiento, alta resolución y habilidad para llevar a cabo con alta eficiencia tareas repetitivas. Las características propias de la industria ferroviaria en la que tradicionalmente la penetración de la tecnología es muy lenta, ha hecho que la presencia de la automatización de procesos en el campo ferroviario no sea muy alta. Sin embargo cada vez cobra mayor importancia ya que se generan constantemente artículos sobre nuevos prototipos de equipos y ferrocarriles. El empleo de sistemas por computador y la automatización en las tareas de inspección, aumentan la capacidad de procesamiento y permiten realizar una auscultación fiable, segura y repetible sin interferir en el tráfico ferroviario, en general el uso de la automatización de procesos en los ferrocarriles va a incrementar la seguridad, la calidad del servicio y disminuirá los costos y los tiempos de viaje. Las características de los sistemas empleados dependen de cada aplicación en particular. En las últimas dos décadas varios sistemas automatizados han sido implementados en el campo ferroviario en base a su funcionalidad se pueden clasificar en cuatro grandes grupos: 1. Sistemas de inspección de infraestructuras, 2. Sistemas de inspección de trenes, 3. Sistemas para mantenimiento y operación, 4. Sistemas relativos a los pasajeros. Dentro de los sistemas para la inspección de la infraestructura ferroviarias se pueden distinguir varias aplicaciones: Sistemas utilizados para medir los parámetros de vía (Alippi02), (Cibernetix), (Stella02). Sistema de medida de la geometría y desgaste del hilo de contacto: (Borromeo02). Monitorización de paredes de túneles: (Ortu01). Sistemas que detectan

obstáculos: (Ukai96), (Reost), (Ruder03), (Garibotto03) y en la línea aérea de contacto (Moller01).

Algunas compañías ferroviarias incorporan en un único coche laboratorio distintos sistemas para la inspección de varios de estos parámetros (Fumi01), (Naganuma01). Para realizar un mantenimiento preventivo y eficaz los sistemas de inspección deben ser capaces de realizar sus tareas a velocidades lo suficientemente altas para que no interfieran en el tráfico ferroviario. Los sistemas que se utilizan para analizar el desgaste en ruedas y Pantógrafos: (Fagnano01), (Wheelscan), (Imagemap), se incluyen en la categoría de los sistemas empleados para la inspección de trenes. Las tareas de mantenimiento y operación requieren interaccionar activamente con el entorno y pertenecen al campo de la robótica. Los sistemas de visión en este tipo de aplicaciones particular requieren calcular información tridimensional a partir de imágenes bidimensionales. Las aplicaciones en las que podemos encontrar este tipo de sistemas son las propias de mantenimiento tales como: soldadura, limpieza y pintura (Parker98). Otros sistemas utilizados en el entorno ferroviario son los sistemas que se encargan de monitorizar las zonas de acceso de pasajeros (Albiol101), monitorizar zonas de seguridad (Fry97). Para abordar la mejora en la precisión de los sistemas de captación de energía eléctrica, en primer lugar se realizó un análisis de las variables que intervienen en el proceso para identificar las relaciones entre ellas. Los sistemas anteriores están referenciados en: (Albiol, 2001), (Alippi, 2002), (Fagnano, 2001), (Firpo, 2003), (Garibotto, 2003) y (Moller, 2001).

Se determinó que la dispersión en las medidas se debe principalmente a la variabilidad en las propiedades reflexivas del Pantógrafo y la no uniformidad en la distribución de la luz. Las características del hilo de contacto y del Pantógrafo, las condiciones en las que se encuentra (presencia de grasa, coque, ralladuras, contaminación) y el tipo de tráfico ferroviario que circula por la vía son algunas de las causas por las que las propiedades reflexivas puedan variar hasta en un orden de magnitud. La disposición de la fuente luminosa y del sistema de adquisición es una de las causas que puede ocasionar que la iluminación no sea homogénea en todo el campo de medida. (Borromeo, 2004)

La fricción continua, entre el hilo de contacto y el Pantógrafo, produce un desgaste en ambos elementos, ocasionando en el hilo de contacto una reducción en su sección efectiva, esta reducción hace que aumente la resistencia eléctrica, y con ello las pérdidas en la línea, y el aumento en la temperatura del hilo favorece a que se produzca un mayor desgaste. Un desgaste excesivo, provoca la rotura del hilo de contacto. Parando el tráfico ferroviario con los inconvenientes: económicos, sociales, ambientales y en la calidad del servicio. En el caso del Pantógrafo un desgaste extremadamente acelerado en el frotador, como consecuencia del uso intensivo de la tracción eléctrica, el aumento de la capacidad de las líneas y de la velocidad, traerá como consecuencia la salida de servicio del sistema. (Borromeo, 2004).

1.1.3 Expansión ferroviaria en Venezuela

Las posibilidades de un desarrollo endógeno, equilibrado y sostenible de Venezuela, sin duda serán impulsados considerablemente por la ejecución del plan ferroviario nacional, que guiado por una visión holística, podría convertirse en la palanca que transforme el país. (Bruno. 1982)

El sistema ferroviario nacional (SFN), según la constitución de 1999, es prioridad de la nación en su ejecución y materialización, este se encuentra actualmente en construcción, la autoridad del mismo recae sobre el Instituto de Ferrocarriles del Estado (IFE), adscrito al Ministerio de Obras Públicas y Vivienda de Venezuela. La red de ferrocarril cumplirá funciones de transporte y carga, y en la misma funcionarán dos tipos de trenes: los de largo y corto recorrido. El sistema estará formada a su vez por 10 subsistemas los cuales son:

- Sistema ferroviario Ezequiel Zamora: tramo Caracas-Cúa y el tramo la Encrucijada-Puerto Cabello.
- Sistema ferroviario Simón Bolívar (centro occidental): tramo Puerto Cabello-Barquisimeto, Tramo Yaritagua- Acarigua-Turén
- Sistema ferroviario norte occidental: tramo Morón-Tucacas-Yaracal- Ricito. Tramo Yaracal- Coro- Punto Fijo.
- Sistema ferroviario norte llanero: tramo Maturín- Anaco- tramo Anaco-Tinaco, tramo Tinaco-San Cristóbal.

- Sistema ferroviario centro-sur: tramo San Juan de los Morros-Calabozo- San Fernando y tramo Chaguarama- Cabruta- Caicara del Orinoco.
- Sistema ferroviario oriental: tramo Guanta- Naricual; tramo Puerto Ordaz- Maturín- Manicuaire, tramo Anaco- Barcelona- José- Píritu- Higuerón- Tuy Medio.
- Sistema ferroviario occidental: tramo Maracaibo-Ciudad Ojeda- sabana de Mendoza; tramo Sabana de Mendoza- Carora- Barquisimeto; tramo Encontrados- Machiques; tramo Machaques- Maracaibo- Puerto las América.
- Sistema ferroviario de la región Guayana: tramo San Fernando- Tucupita; tramo Caicara- Puerto Ayacucho.
- Sistema ferroviario nacional Caracas la Guaira: tramo Caracas la Guaira.
- Sistema ferroviario recreacional: tramo parque recreacional el Encanto.

De lo ante expuesto se concluye que es de suma importancia para el país aquellos proyectos que estén enmarcados dentro del área de ferrocarriles y para el Ministerio de Ciencia y Tecnología entran en cartera, como proyectos viables.

Este trabajo se focaliza en el Sistema ferroviario “General Ezequiel Zamora” específicamente en el tramo: Caracas-Cúa el cual se encuentra en funcionamiento.

Los ferrocarriles en el mundo funcionan en base a vapor, diesel, y electricidad; Tomando esta energía eléctrica por carril o por catenaria, este estudio se basa en el sistema ferroviario que toma la energía a través de una Catenaria y un Pantógrafo, por lo que es necesario saber como esta constituida la misma lo cual pasamos a describir a continuación:

1.2 Sistema de suministro eléctrico

La energía eléctrica de la red nacional llega a la subestación de Charallave norte en 115 KV de tensión alterna trifásica, gracias a dos transformadores de 35/40 MVA ubicados en esta subestación, este nivel de tensión es transformado a 25 kV monofásica, esta energía será suministrada a la Catenaria, y luego al ferrocarril a través del frotador del Pantógrafo, donde será

nuevamente transformada y convertida la tensión necesaria que necesitaran los motores de tracción (Manual IFE).

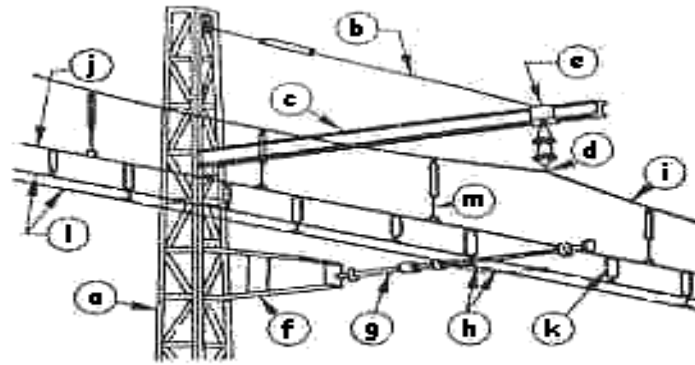
Se define como Catenaria el sistema que transmite potencia eléctrica al ferrocarril y que es captada por el Pantógrafo, las tensiones más comunes van desde 600 V a 3 KV en corriente continua, o entre 15 y 25 KV en tensión alterna. La mayor parte de las instalaciones funcionan con corriente (continua o alterna) monofásica, aunque existen algunas instalaciones trifásicas. En las líneas aéreas, normalmente el polo positivo de la instalación es la Catenaria y el polo negativo son los carriles sobre los que circula el tren. Las corrientes provenientes de la subestación (transformadora o rectificadora de la tensión de la red general) llegan al tren por la Catenaria y vuelven a la subestación a través de los carriles de la vía férrea.

1.2.1 Catenaria

1.2.1.1 Elementos constructivos de la catenaria

Como se aprecia en la figura 1.1, el elemento fundamental de todas las líneas de tracción eléctrica es el hilo de cobre, llamado hilo de contacto, que transmite la energía necesaria al ferrocarril. Este dispositivo que conduce la corriente hasta la unidad móvil y aquel que retorna dicha corriente. Cable Sustentador: Es un cable que sustenta al hilo conductor para evitar que forme una curva debido a su propio peso, y con este se logra que el hilo conductor quede lo mas horizontal posible. Las Péndolas: Son los elementos de unión entre todos los cables e hilos que constituyen la Catenaria, su función principal es la de sujetar al hilo de contacto en su posición correcta, manteniendo los hilos prácticamente paralelos, y a una determinada altura sobre los carriles. Las Mensulas: Son dispositivos cuya función es sustentar las diferentes líneas. Aisladores: Dispositivo eléctrico cuya función es independizar una vía o grupo de vías de una misma estación, son los encargados de aislar la Catenaria del poste, se fabrican con porcelana y actualmente con vidrio templado por ser más livianos. Los Aisladores de sección: Son aquellos dispositivos cuya función es aislar diferentes partes de la Catenaria. Pórticos: Es la unión de la parte superior de dos postes situados a ambos lados de dos o mas vías por medio de una viga o

por cables. Y su función es sustentar las líneas de contacto de las vías que abarca. Los soportes o postes: Su función es sostener las mensuras, las vigas y los cables de los pórticos. Pueden ser de acero, hormigón armado o de madera.



- | | |
|----------------------------|-------------------------------|
| a -> Poste | h -> Brazo de atirantado |
| b -> Tirante | i -> Cable portador principal |
| c -> Ménsula | j -> Cable portador auxiliar |
| d -> Cadena de suspensión | k -> Péndola |
| e -> Pieza de fijación | l -> Hilos de contacto |
| f -> Ménsula de atirantado | m -> Péndola deslizante |
| g -> Estabilizador | |

Figura 1.1 Elementos de la Catenaria.

1.2.1.2 Instalación de la Catenaria

Siempre hay que tratar de mantener los hilos de contacto y el portador auxiliar en la vertical del portador principal, esto se consigue de la siguiente manera:

En el tramo recto se fija la posición del portador auxiliar mediante un estabilizador en cada poste.

1. En curva hay que incluir, además unos brazos de atirantado para impedir el desplazamiento transversal de los hilos de contacto. En este caso la Catenaria tendrá la forma de los lados sucesivos de un polígono.

2. Vano: Es la distancia continua entre dos postes que sustentan a la línea aérea de contacto.
3. Cantón: Son las divisiones entre 900 y 1200 metros, en que se puede dividir la línea aérea de contacto. En el centro de cada cantón se montan unos cables que sujetan y estabilizan al sustentador e hilos de contacto, impidiendo que toda la línea se desplace hacia un lado y otro. El punto central de un cantón llamado punto fijo, debe coincidir con una mensura o poste. La estabilización de esta mensura se realiza mediante un cable de acero, convenientemente aislado, que sujeta al conjunto de suspensión y a través de este el sustentador y los hilos de contacto. Los cables de acero se fijan a los postes adyacentes y para evitar que estos se doblen se refuerzan mediante un tirante, llamado tirante de anclaje de punto fijo.

Sistema de compensación o regulación

Debido a la dilatación térmica los cables conductores se ven sujetos a variaciones de longitud, producida por los cambios de temperatura. Al variar la longitud de los cables la geometría de la Catenaria varia, aumentando la flecha de los cables al aumentar la temperatura. El elemento mas sencillo para evitar este efecto es un equipo de contrapeso que tiran del cable manteniendo constante su tensión mecánica, la cual mantiene constante la geometría del mismo.

Seccionamiento: Se denomina así a la división mecánica de la línea en partes de longitud similares, al objeto de evitar un alargamiento excesivo de los cables por efecto de dilatación térmica, para que el Pantógrafo no encuentre ninguna discontinuidad en la línea, los cables se deben solapar, de tal forma que cuando un cantón de línea termina a continuación empiece el siguiente, la zona donde se solapa una sección de cable con otra se denomina seccionamiento.

Circuito de retorno: Es el conjunto formado por los carriles y los cables que unen estos con el negativo de la subestación. El riel es utilizado principalmente como circuito de retorno de la corriente eléctrica. Esta constituido por dos cables conductores aéreos uno por la serie de soporte del riel derecho y el otro por la serie del riel izquierdo. Si la resistencia del circuito de retorno es alta, se producirá una caída de tensión excesiva, lo que motiva la generación de corriente de fuga a tierra, e inducción de interferencias en las líneas de

transmisión, por lo tanto, la resistencia de todo el circuito de retorno debe ser baja.

Dispositivo de protección para líneas aéreas: Estos equipos protegen de descargas eléctricas a los alimentadores, equipos, personas, y animales. La línea aérea de contacto debe protegerse contra los fenómenos atmosféricos y sobre tensiones al objeto de evitar que un rayo caído en las instalaciones o una sobre tensión generada por derivación de la Catenaria o por cualquier otra causa, produzca daños en las instalaciones. Protección externa: Consiste en captar el rayo y derivarlo a tierra. Pantalla de protección: Consiste en realizar con los elementos constructivos de la propia instalación una pantalla de faraday. Equipotencialidad: Todos los elementos de la instalación deben estar al mismo potencial, utilizando los equipos adecuados como son: descargadores de rayos, y descargadores de sobre tensión.

Dispositivos de protección para corriente de corto circuito: Se instalan para facilitar el flujo de la corriente de corto circuito y para mejorar la sensibilidad de detección de los relays en la subestación cuando se producen picos de corriente. Dispositivos de puesta a tierra: Esta compuesto por un conductor eléctrico conectado a tierra por medio de un electrodo, una jabalina es utilizada para colocar a tierra la instalación de la línea aérea.

Cable tierra: Es el cable de acero o aluminio que une todos los postes entre si, conectándose a tierra cada 100 metros aproximadamente. Tramo neutro: Su función es mantener la separación eléctrica entre las líneas de contacto alimentadas con tensiones desfasadas entre ellas.

Área de seccionamiento: Montaje de línea aérea de contacto, que independiza eléctricamente dos tramos de Catenaria y permite la alimentación sin interrupción de los Pantógrafos a su paso por los mismos pueden ser con puesta a tierra o sin puesta a tierra.

Conjunto de suspensión: Es el sistema para soportar el sustentador, se realiza con una viga de forma especial que se llama cuerpo de mensula, hecha con perfiles metálicos de acero galvanizado. Equipos de vía general: Para unir el cuerpo de mensula al terreno se colocan postes fabricados con acero galvanizado.

Línea aérea de contacto poligonal atirantado: Evita que el hilo de contacto roce siempre en el mismo sitio. Conjunto atirantado: Para conseguir el desplazamiento en zig-zag de los hilos de contacto se tira de los hilos de contacto por medio del conjunto de atirantado.

Durante la instalación de la catenaria se debe cumplir una serie de condiciones. En lo particular, la altura de la línea de contacto con respecto a la superficie de rodamiento se encuentra estandarizada. Las condiciones para determinarlas son varias, dependiendo de cada país, pero son universales:

- Sobre la línea de contacto se aplica alto voltaje, por lo que se debe guardar una distancia de seguridad apropiada.
- En los cruces con pasos a nivel se debe adoptar una altura suficiente para que no se presenten problemas con automotores.
- La altura de la línea de contacto debe estar en concordancia con la altura del material rodante para que se pueda permitir la adecuada operación del Pantógrafo. Es necesario suspender la línea de contacto lo mas bajo posible para reducir los costos, pero solamente después de estudiarlo cuidadosamente. Esta altura se toma desde el plano formado por los rieles y la línea de contacto.

La línea Catenaria posee una desviación con respecto al eje de vía, formando un zigzag, para producir un desgaste homogéneo en el frotador del Pantógrafo. Esta desviación se obtiene con dos tipos de mensulas instaladas en forma alternada, la diferencia entre estas es que una tensa la línea hacia el poste y la otra en sentido contrario. En las curvas es un tanto dificultoso, ya que se corre el riesgo de exceder la desviación máxima (que depende del Pantógrafo), por lo que se debe prestar especial atención en estos puntos. Es recomendable que la línea de contacto se encuentre siempre a la misma altura con respecto al riel, ya que se pueden provocar despegues del Pantógrafo donde existen cambios de altura, pero si hay que hacerlo se debe hacer de una forma que no sea muy brusca, este es el caso cuando se encuentra en la vía puentes y túneles en este caso se recomienda un gradiente máximo de 3/1000.

La línea de contacto debe tener una baja resistencia eléctrica, ya que por esta circula la mayor parte de la corriente de alimentación del material rodante,

además debe ser resistente a la tracción y a la fatiga mecánica y como por esta se desliza constantemente el Pantógrafo, debe ser resistente al desgaste y al calentamiento. Los materiales generalmente utilizados son el cobre duro y sus aleaciones, puesto que satisfacen las condiciones anteriormente mencionadas. En la aleación se combina cobre con estaño para mejorar la resistencia al desgaste. En cambio la línea del sustentador que es la línea que sostiene a el hilo de contacto y a las péndolas forma una curva llamada propiamente (Catenaria) y se determina según sea la tensión mecánica, el peso unitario de esta y el peso unitario de la línea de contacto mas las péndolas. El material utilizado generalmente es el acero, aunque también se usa el cobre para mejorar la conductividad, esta línea consiste en un hilo retorcido compuesto por 7 o 19 hilos.

Las péndolas: Se utilizan para suspender la línea de contacto de la línea de sostén o sustentador, regulando la longitud de las péndolas se logra una mayor horizontalidad de la línea de contacto, la distancia entre péndolas es de 5 metros, esta constituida por un herraje de bronce fosforoso y una mordaza de aleación de cobre y aluminio. Cuando esta es de acero, se pueden colocar carretas plásticas entre este y el péndulo, porque existe una pequeña diferencia de tensión que se manifiesta con un pequeño arco cuando esta se separa con la pasada del Pantógrafo.

Las ménsulas: Son estructuras compuestas por perfiles de hierro, para suspender la línea Catenaria desde el poste. Existe una gran variedad de formas y estas dependen del tipo y el peso de la Catenaria. Se clasifican en fijas y móviles. Las fijas se sujetan al poste mediante abrazaderas y no le permiten ningún tipo de movimiento a la Catenaria, estas se instalan donde la separación entre postes y la velocidad de los trenes no es grande. Las ménsulas móviles poseen un pivote en la unión con las abrazaderas que le permiten girar y de esta manera absorber las dilataciones y contracciones de la Catenaria que se producen con los cambios de temperatura. En la mensula se instala un brazo tensor, este absorbe las vibraciones y movimientos transversales de la línea Catenaria, provocados por la pasada del Pantógrafo. Además es el que permite realizar la desviación de la línea Catenaria,

tensionándola hacia el poste o en sentido contrario, si la tensión es hacia dentro se denomina tipo I, y si es hacia fuera tipo O.

Geometrías y esfuerzos

- La Catenaria es vertical y su tamaño normal al punto de suspensión $H \leq 1$ metro.
- La tensión mecánica de cada conductor será de: sustentador: 1000 Kg y el hilo de contacto: 1000 Kg.
- Los vanos máximos serán de 60 metros.
- Las condiciones de máximo viento están previstas por el máximo de vanos.

1.2.1.3 Características eléctricas

La Catenaria está diseñada para operar en el rango siguiente: Tensión de suministro según normas (U.I.C)

- Nominal 25 Kv
- Máxima 27 Kv.
- Mínima 19 Kv.
- Mínima instantánea 17,5 Kv.
- Servicio normal 21,5 Kv.
- Frecuencia de la red 50 Hz.

Características operativas: El material rodante y el tráfico condicionan la línea aérea de contacto de acuerdo a su construcción y características eléctricas y fundamentalmente a través del diseño de su elemento captor de energía llamado Pantógrafo, para el diseño la fuerza Catenaria-Pantógrafo ha de ser de entre 5 y 7 kg. La línea de contacto será capaz de transmitir toda la potencia requerida por el material rodante a fin que este desarrolle su aceleración máxima de operación. Además el hilo de contacto deberá resistir las elevaciones de temperatura hasta los 80 °C y la fatiga debido a las vibraciones. (Manual del IFE)

El hilo de contacto

Es el hilo que posee la energía necesaria que debe ser captada por el Pantógrafo para alimentar los diferentes equipos en el ferrocarril, generalmente

se usa de cobre electrolítico duro o cobre al cadmio de 107 mm², este se desgasta por causas eléctricas o mecánicas, el primero se origina por el arco eléctrico que tiene lugar en aquellos puntos donde se produce un contacto deficiente entre el frotador del Pantógrafo y el hilo de contacto. En estos puntos se produce una separación de ambos elementos produciéndose un arco eléctrico cuyo calor es el responsable del desgaste antes mencionado. Para evitar que este problema se presente se debe tener especial cuidado en aquellos puntos que frecuentemente son causas de separación del Pantógrafo como:

1. Puntos duros de la línea, puntos de sujeción para suspensión, atirantado, etc.
2. Puntos donde se modifica la pendiente de la línea de contacto.
3. Tramos en los cuales la tensión mecánica de la línea no sea la adecuada.
4. Donde existan torceduras del hilo de contacto, estas se producen en obras y debe verificarse que en el momento de la entrega no exista alguna.
5. en las paradas donde se producen los arranques de los vehículos y por lo tanto se producen fuertes consumos de corriente.
6. El desgaste mecánico se produce por rozamiento, siendo directamente proporcional al coeficiente de roce, a la presión del contacto, al tráfico de trenes y al número de Pantógrafos por tren.

El sustentador

Es el cable hizado entre dos puntos o postes, presenta una curva que se llama Catenaria, La fuerza que produce este fenómeno es el peso de la Catenaria. Para evitar que se produzca la Catenaria sobre el hilo conductor, se le colocara a un nivel superior un hilo llamado sustentador y varios tensores.

1.2.2 El Pantógrafo

El Pantógrafo ejercerá una fuerza sobre la Catenaria para mantener el contacto óptimo a través de un mecanismo neumático, como se muestra en la figura 1.2.

1.2.2.1 Descripción del Pantógrafo:

Los vehículos de tracción eléctrica necesitan un sistema de captación de corriente que contactando con la Catenaria les permita obtener la corriente eléctrica que necesitan, al sistema mecánico encargado de realizar esta captación se le denomina Pantógrafo. La función se realiza de forma óptima cuando durante la marcha no se realizan desconexiones del frotador del Pantógrafo y la Catenaria.



Figura 1.2 El Pantógrafo.

1.2.2.2 Tipos de Pantógrafos:

Cuadrilátero articulado compuesto: Permite el desplazamiento del frotador independientemente del movimiento de los brazos inferiores del Pantógrafo. El resorte superior que va unido al frotador es el encargado de los pequeños movimientos y soporta una especie de mesilla donde esta ubicado el frotador. Los brazos inferiores llevan en su base otro resorte cuando el Pantógrafo se encuentra abajo se halla sometido a tracción sometido por el esfuerzo de un actuador neumático, mientras en el actuador hay aire a presión el muelle esta traccionado y el Pantógrafo no se eleva. Cuando se pone a escape el cilindro neumático que hace de actuador deja de hacer fuerza entonces el muelle tira de los brazos elevando el Pantógrafo hasta contactar con la Catenaria.

Frotador rotatorio flotante: José Sánchez Alba, patentó un cilindro que gira por debajo de la Catenaria y a la vez va transmitiendo la intensidad de corriente que recibe.

Receptor transmisor de K.V.A: Cilindro giratorio cilindro recubierto de grafito prensado, solo necesita una fuerza elevadora de 2 kilos.

Pantógrafo monobrazo: En 1999 fue ofrecido a RENFE, ventaja adicional es que gira su codo en el sentido de la marcha, y su peso no llega a los 80 Kilogramos.

Modelado del Pantógrafo de mesilla: Es un sistema de tres masas unidas por resortes, la masa superior incluye la mesilla con el frotador, la central corresponde con los brazos del Pantógrafo, mientras que la inferior es la masa asociada a la estructura que se une al techo de la unidad ferroviaria. En cuanto a los resortes considerados el superior es el que se encuentra entre la masa de la mesilla y la de los brazos, el del medio corresponde con el resorte inferior de estos brazos y el último resorte simula la elasticidad de la unión entre la estructura inferior del Pantógrafo y el techo de la unidad ferroviaria.

Polígono articulado que termina en una mesilla superior donde se coloca el frotador. Este sistema dispone de aislantes eléctricos para aislar el techo de la locomotora. Fueron usados durante muchos años, pero debido al incremento de la velocidad fue necesario cambiar su diseño, se trato de disminuir la masa de todo el sistema para que el movimiento del Pantógrafo se viera lo menos afectado por la dinámica de la marcha. Este Pantógrafo poligonal presentaba muchas articulaciones que con el tiempo derivaban en holguras, que traía como consecuencia un mal funcionamiento del mismo. En la actualidad los pantógrafos articulados, constan de apenas tres articulaciones. Este, que forma parte del objeto de estudio, consta de las siguientes partes constitutivas:

Las partes que mas destacan son: La mesilla, soporte de mesilla (brazos), sistema neumático y el frotador.

1.3 Desgaste en dos superficies en contacto

Las superficies en contacto, en este caso serán el hilo de contacto energizado y el frotador del Pantógrafo. Cuando se tienen dos superficies sometidas a

fricción se acercan y sus rugosidades interactúan en la medida en que la velocidad tienda a cero. Cuando finalmente no hay movimiento, un buen porcentaje de las rugosidades de las dos superficies quedan entrelazadas en forma semejante a como quedan los dientes de dos serruchos cuando se superponen; de tal forma que todos sus dientes quedaran entrelazados y luego aplicáramos a uno de ellos una fuerza suficiente como para ponerlo en movimiento, seguramente que todos supondríamos lo mismo basados en que si la fuerza aplicada es lo suficientemente alta, la gran mayoría de los dientes se fracturarían quedando inservibles los dos serruchos. (Albarracin, 2005). El desgaste efecto directo de la fricción constituye una de las partes componentes de la Tribología. Se considera que del 80-90% de los elementos de máquinas se sustituyen producto del desgaste, lo que demuestra la incidencia del mismo en la economía de un país. El desgaste es un proceso complejo que se produce en las superficies de los cuerpos debido a la fricción de otro cuerpo o medio, trayendo por consecuencia la variación de la micro y macro geometría superficial; de la estructura y de las propiedades mecánica - físicas del material con o sin pérdida de material. Dinámica del desgaste El incremento de la durabilidad de los elementos está íntimamente relacionado con la velocidad del desgaste y por ende con la característica dinámica del desgaste. La variación del desgaste con el tiempo (dinámica del desgaste) en su forma más conocida se muestra en la Figura 1.3.

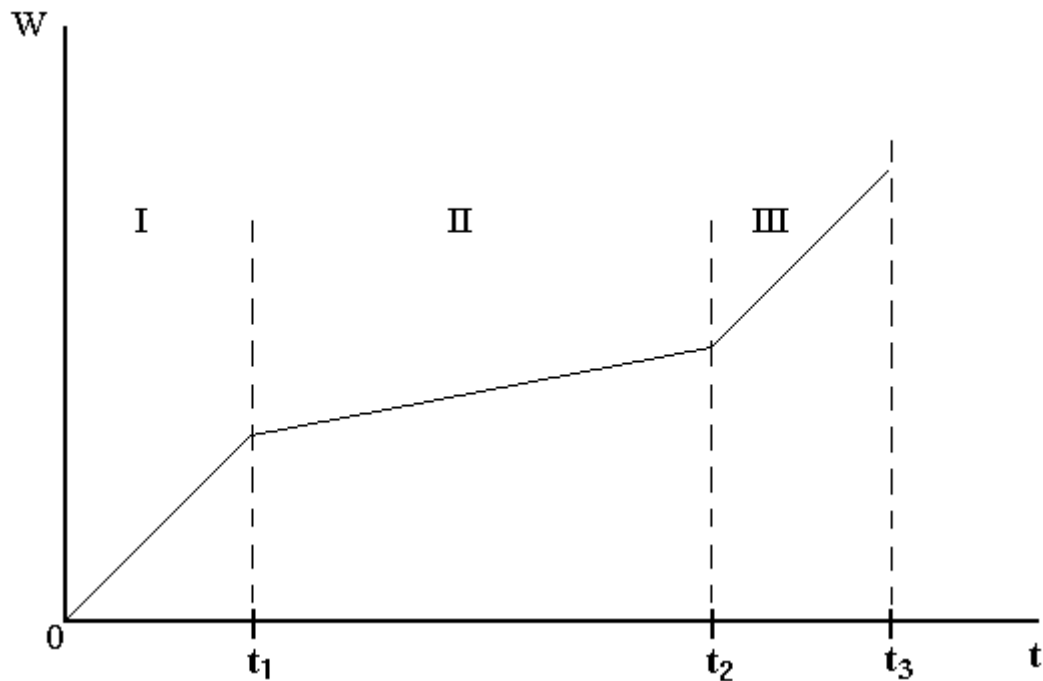


Figura 1.3 Variación del desgaste con el tiempo

1.3.1 Dinámica del desgaste

El período o etapa de asentamiento (I) se caracteriza por un área de contacto real muy pequeña lo que representa altas presiones reales; esto es debido a que solo entran en contacto los "picos" más altos de la rugosidad superficial. El desgaste durante este período es muy intenso y puede tener una influencia apreciable en la durabilidad.

Durante el período de desgaste establecido (II), el área de contacto aumenta debido a la eliminación de los "picos" de la rugosidad superficial. Con el transcurso del tiempo el desgaste va aumentando hasta llegar a un valor crítico o permisible (III). Cuando se llega a este valor del desgaste se inicia el período de avería de la pieza o unión tribotécnica, el cual se caracteriza por un incremento de la temperatura, un aumento del nivel de ruido, la presencia de cargas dinámicas (vibraciones), todo lo cual lleva si no se realiza el cambio de la pieza a un desgaste catastrófico. (Álvarez, 1993). Uno de los problemas no resuelto en la temática del desgaste es la designación y clasificación del desgaste en las superficies de los cuerpos sólidos; por tal motivo los conceptos más utilizados son:

1. Desgaste adhesivo.- También llamado desgaste por fricción o deslizante, se produce debido a la adhesión molecular entre los cuerpos en contacto.
2. Desgaste por fatiga. Desgaste debido a causas mecánicas producto de
3. Tensiones variables y repetidas.
4. Desgaste abrasivo.- Desgaste mecánico como resultado de la acción de corte o rayado de asperezas de alta dureza o de partículas abrasivas.

La importancia de cada tipo de desgaste en la industria según Eyre es la siguiente.

Abrasivo	50 %
Adhesivo.....	15 %
Erosivo	8 %
Mecánica - corrosivo.....	5 %
Oxidación dinámica.....	8 %
Fatiga y otros	14%

1.3.2 Fallas en la captación de la energía eléctrica

Las fallas pueden ocurrir por las siguientes causas:

1. Sobrecarga de corriente
2. Baja fuerza de contacto
3. Mal estado del cable
4. Mala trayectoria de la corriente
5. Material erróneo
6. Mal decalaje del cable
7. Estado del Pantógrafo
8. Suspensión del cable
9. Ajuste del aislador seccional
10. Ángulo del pivote
11. Masa del cabezal
12. Materiales mezclados
13. Funcionamiento mezclado
14. Condiciones atmosféricas
15. Regletas mal montadas
16. Sección del carbón demasiado pequeña

- 17. Sección del carbón demasiado grande
- 18. Alta fuerza de contacto
- 19. Velocidad del vehículo

Sobrecarga de corriente

Las hojas de datos de calidades de Morganite proporcionan cifras de las corrientes de diseño normales. Pueden superarse durante periodos cortos, pero deben establecerse corrientes de funcionamiento reales para cada aplicación, el factor limitador es la carga de corriente estática. Las peores condiciones de carga de corriente se producen con carbones nuevos en cables nuevos. En este estado, el área de contacto es mínima. Si la corriente supera el valor máximo permitido en esta condición (calculado a partir de los gráficos de Morganite), puede producirse un sobre calentamiento que podría ablandar o quemar el cable. Con carbones y cables gastados la carga de corriente estática permisible es significativamente mayor. Esto puede producirse a menudo utilizando una regleta de carbón más ancha o una adicional. Los carbones metalizados tienen un límite de carga estática mayor pero debe prestarse también atención al efecto del aumento de peso.

Baja fuerza de contacto

Debe comprobarse la fuerza de contacto regularmente durante toda la operación de movimiento del Pantógrafo. La fuerza correcta viene determinada por el diseño del cable aéreo. Una fuerza débil provoca una pérdida de contacto, chispas y una vida útil reducida. Las diferencias entre Pantógrafos en el mismo sistema indican normalmente áreas de problemas. La fuerza de contacto puede verse afectada por problemas de cojinetes, o un cambio en el diseño y el peso del cabezal.

Mal estado del cable

La interfaz entre carbón y cable depende del estado del cable. Un cable rugoso aumentará el desgaste del colector causando daños mecánicos y trastornos en el cabezal troncocónico. Si se utiliza carbón por si solo, el estado del cable mejorará eventualmente y seguirá siendo bueno. Sin embargo, si se utilizan

colectores de metal por si solos, o junto con carbón, es probable que el cable sea rugoso.

Mala trayectoria de la corriente

Un mal contacto eléctrico entre el carbón y el Pantógrafo puede llevar a un cierto número de problemas. Cuando la corriente está dividida entre dos conexiones o regletas, la elevada resistencia en una forzará la corriente a través de la otra. Esta carga desigual puede causar sobrecarga, acortar la vida útil o sobrecalentamiento. Las envueltas de metal y los porta contactos quemados son síntomas de ello. Puede producirse erosión por arco eléctrico del carbón si la conexión con la envuelta poco sólida. Cuando se monte, es importante asegurarse de que todas las terminaciones y superficies de contacto estén limpias.

Material erróneo

La mezcla de calidades de carbón puro con metalizado puede provocar problemas debido a la distribución desigual.

Mal decalaje del cable

El modelo de desgaste en las regletas depende del decalaje del cable. Un buen decalaje proporciona un desgaste uniforme a lo largo de toda la longitud de la regleta. Un fuerte desgaste en un área o un ranurado uniforme pueden ser el resultado de un decalaje incorrecto. El problema aumenta por el hecho de que, una vez se ha desarrollado una ranura, el movimiento del cable queda limitado. Eventualmente, pueden producirse daños en el cable. Pueden conseguirse algunas mejoras aumentando la longitud de contacto del carbón. Sin embargo, la única solución es corregir la pauta de decalaje del cable aéreo, no es siempre una propuesta práctica.

Estado del Pantógrafo

Un correcto funcionamiento del Pantógrafo es esencial para una buena captación de corriente. Cualquier deficiencia se reflejará en el estado de carbón y porta contactos. Un solo Pantógrafo que muestre esto indicará la necesidad de una inspección posterior. La inspección debe incluir la presión del contacto,

la trayectoria de la corriente, el estado del cojinete y el estado general del Pantógrafo.

Suspensión del cable

Las regletas de carbón funcionan mejor en sistemas de cables tensados que en sistemas de cables flojos. Además, un tamaño de cable mayor aumentará la fuerza de impacto a causa de su aumento de masa. Aunque puede alterarse la tensión del cable, muchas de estas características no pueden alterarse. Sin embargo, deben valorarse.

Ajuste del aislador seccional

Normalmente los aisladores están ajustados en el centro de la trayectoria y, de esta forma, las regletas de carbón tenderán a mostrar el daño resultante sólo en un lugar. Los daños típicos pueden incluir áreas de desconchamiento, rotas o quemadas y erosionadas debido a la formación de arcos. Este problema es más frecuente en sistemas de tranvías y LRT debido a los números implicados.

Ángulo del pivote

El ángulo del pivote del cabezal tiene una influencia sobre la estabilidad y, de este modo, sobre el grado de desgaste. Los ángulos más grandes proporcionan mejores resultados, pero la anchura del cabezal está limitada normalmente por los aisladores de sección. Cuando se pasa de colectores metálicos a colectores de carbón, la estabilidad mejora normalmente aumentando la anchura de regleta.

Masa del cabezal

La masa del cabezal es decisiva para la capacidad de mantener las regletas en contacto con el cable. Demasiado peso hace que el contacto sea inestable. Desafortunadamente, una construcción demasiado ligera sólo permite utilizar carbones más pequeños y débiles. Ambas condiciones reducen la vida útil. Los diseñadores deben equilibrar constantemente los dos parámetros en relación con el movimiento y la velocidad del cabezal para proporcionar un rendimiento óptimo. A velocidades mayores, esta ecuación se vuelve incluso más importante.

Materiales mezclados

El carbón trabajará junto con todos los demás materiales del colector en un sistema. En situaciones de arrastre, esto es esencial para comprobar su viabilidad. Sin embargo, salvo que se utilicen exclusivamente carbones, no se puede desarrollar una pátina protectora en el cable y se perderán muchas de sus ventajas. Pueden mezclarse diferentes calidades de carbón en un sistema sin problemas.

Funcionamiento mezclado

No deben mezclarse diferentes calidades de carbón en el mismo cabezal troncocónico o en un Pantógrafo conectado eléctricamente. Pueden surgir problemas a causa de la mezcla de carbones puros y metalizados así como de la mezcla de calidades fabricadas por diferentes fabricantes. Puede ser el resultado de diferentes ritmos de desgaste, esfuerzos mecánicos y propiedades eléctricas.

Condiciones atmosféricas

Las condiciones atmosféricas en un sistema pueden variar mucho con el tiempo y la ruta, permitiendo que se experimenten ritmos de desgaste y de rendimiento diferentes. En particular, el hielo en el cable causará un rápido desgaste, aunque esto puede afectar sólo al primer vehículo de una flota. La pátina de carbón ayudará a reducir el grado de congelación. Por este motivo, las comparaciones entre diferentes calidades deben realizarse al mismo tiempo en condiciones similares.

Regletas mal montadas

Las regletas mal montadas provocarán una mala conexión eléctrica y esfuerzos mecánicos. Los defectos necesitarán una inspección cuidadosa para determinar cualquier pauta común para los cabezales troncocónicos.

Sección del carbón demasiado pequeña

Una sección demasiado pequeña puede proporcionar una capacidad de transporte de corriente insuficiente, así como esfuerzos mecánicos. Sin

embargo, el aumento del tamaño requerirá estudiar el peso y el efecto sobre la aerodinámica.

Sección del carbón demasiado grande

Esto puede dar como resultado un cabezal troncocónico demasiado pesado, la carga de corriente debe determinarse antes de reducir el tamaño.

Alta fuerza de contacto

Una fuerza de contacto demasiado elevada puede tender a elevar el cable en detrimento del rendimiento del cabezal troncocónico. El aumento de las fuerzas mecánicas puede provocar la rotura de carbones. Puede producirse un efecto similar a alta velocidad debido a que la aerodinámica aumenta la fuerza de contacto.

Velocidad del vehículo

La aerodinámica tenderá a aumentar la fuerza de contacto. Las altas velocidades también acentuarán cualquier otro problema existente. Por lo tanto, es importante realizar comprobaciones a la máxima velocidad de servicio.

1.3.3 Desgaste del frotador

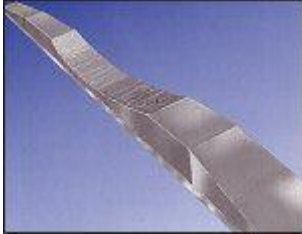
El primer paso es examinar los síntomas como aparecen en los carbones y sus fundas o portaescobillas. Después debe tenerse en cuenta el rendimiento histórico y la frecuencia del suceso. Las partes dañadas son a menudo el resultado de un fallo en cualquier parte del sistema y no constituyen un fallo por sí solas. Por tanto, es vital incluir todas las evidencias en cualquier investigación y no concentrarse solamente en las piezas dañadas.



a) Ranurado

Una pequeña área central del carbón desgastado en ambas regletas. Causado por aisladores seccionales mal ajustados que provocan muchas chispas en este punto. También es posible un daño

de arcos en la funda. Es posible que se vean las chispas en el funcionamiento.



b) Desgaste en el área central de la regleta de carbón

Un mal decalaje del cable hace que éste funcione sólo en el área central de la regleta. A veces es posible aliviar el problema montando una regleta adicional para aumentar el área de contacto central.



c) Excesiva carrera en los extremos y soportes del cable

La carrera sobre los extremos/soportes provoca chispas y daños en el cable. Si es posible, aumentar la anchura del carbón en la cabeza troncónica.



d) Daños en el borde

Mal contacto del cable que provoca muchas chispas. El contacto está afectado por la carga de corriente, la Presión del contacto, el clima, la velocidad, la condición del cable y del Pantógrafo.



e) Daño mecánico

El desconchamiento de los bordes del carbón puede llevar eventualmente a la ruptura. El método de fijación afecta a este hecho y puede determinar lo que es aceptable en el funcionamiento.



f) Toma de cobre en la superficie del carbón

Otro posible resultado de un mal contacto - ver Daño en el borde



g) Daños en la funda

Un mal contacto entre los carbones y la funda provoca puntos calientes. Las temperaturas aquí pueden ser lo suficientemente altas para quemar o incluso fundir la funda.



h) Buena superficie de contacto

La superficie real variará respecto a las condiciones de servicio, pero mostrará un grado de pulido con poco daño mecánico

Figura 1.4 Nivel del desgaste del frotador del Pantógrafo y posibles causas.

Frotadores con carbón: Son resistentes a altas temperaturas, estables hasta el límite del desgaste muy resistentes a la corrosión, captan la corriente segura en todas las condiciones, baja resistencia de contacto al material de roce, baja resistencia al material del soporte, distribución uniforme de corriente en el frotador, baja pérdida eléctrica, buen contacto, incluso con influencias climatológicas, fácil montaje. Un frotador de carbón completo consta del perfil de carbón montado sobre una vaina-soporte. La vaina-soporte se encarga de la transmisión de corriente así como de estabilizar mecánicamente el perfil de carbón contra golpes y deformaciones. Para soportar las influencias atmosféricas se emplea preferentemente como material del soporte el aluminio, chapa de acero resistente a la corrosión y cobre y, en casos especiales, también acero especial (Hoffmann, 2000).

El frotador-conductor de corriente. Es un órgano mecánico y eléctrico cuya misión es transferir corriente de intensidad muy variable entre la masa giratoria y su circuito exterior de alimentación. La primera equivocación que se cometió fue pensar en utilizar un material conductor. Se pensó en cobre, hierro y bronce, los cuales realizaron muy bien su trabajo como conductores, pero pésimo como frotadores debido al alto coeficiente de rozamiento que hay entre dos superficies metálicas. Como estas piezas de metal desgastaban brutalmente los anillos, las simplemente llamadas “escobillas metálicas” fueron descontinuadas. Entonces, el análisis se hizo a la inversa; fue preciso buscar primero un buen frotador que tuviera unas condiciones aceptables como conductor. Después de muchos ensayos se llegó a un material sólido, el carbón. En ese momento era un carbón amorfo de características muy diferentes a las que se conocen hoy en día. Sin embargo, la idea persiste hasta nuestros días debido a que la estructura molecular del carbón es excelente para la fricción, son moléculas hexagonales, están dispuestas en forma laminar y es muy fácil retirar sus capas externas. Se puede comprobar si se toma una escobilla y se le pasa el dedo, se encuentra que desprende muy fácilmente su superficie o última capa. Esa característica es lo que convierte a este material en un grado excelente para la fricción. El carbón es un material denominado auto-lubricado, que no ataca la superficie sobre la cual está frotando y no se desgasta aceleradamente. Ahora, hablar sobre su naturaleza conductora ya es otra cosa. El grafito o el carbón no es un excelente conductor de la electricidad, sin embargo, se puede intervenir eléctrica y químicamente sobre él para convertirlo en un regular o buen conductor de la electricidad, condición que resulta de un valor incalculable cuando más adelante se llega a lo que es la máquina de corriente continuas de corriente alterna con velocidad variable; el mismo motor de inducción con rotor bobinado que presentan una serie de retos para las escobillas y que obligaron a los fabricantes a desarrollar grados especiales e innovar cada día sobre este tema. La energía eléctrica alterna generada en la actualidad puede ser fácilmente convertida a corriente continua, frecuentemente preferida en el suministro de potencia a motores de velocidad variable. Los ferrocarriles en la mayoría de los países han adoptado motores de corriente continua con unidades convertidoras, bien sea en subestaciones o

bien en el mismo tren. En fin, el desarrollo en el diseño y el control de las máquinas de corriente continua las hace sumamente útiles para trabajos de toda naturaleza. El carbón que se utiliza para escobillas eléctricas se descubrió sobre finales del siglo pasado. Así, se puede pensar que, dentro de unos años, la escobilla de carbón para máquinas eléctricas celebrará su primer centenario. Lo simpático es que, probablemente, la escobilla de carbón no cumpla 200 años. La verdad es que los nuevos desarrollos como variadores electrónicos de frecuencia, arrancadores suaves y demás circuitos electrónicos se están utilizando cada vez más para aumentar o disminuir la velocidad de los motores eléctricos. Sin embargo, hay aplicaciones donde todavía es absolutamente indispensable el uso de la corriente continua, como son los motores de tracción en locomotoras, metros, camiones, etc., y las máquinas universales como los motores fraccionarios que mueven los electrodomésticos y las máquinas herramientas. El funcionamiento satisfactorio de las máquinas de corriente continua se ha debido en gran parte al uso de escobillas de carbón especiales y de los polos de conmutación. El estudio de las escobillas de carbón y su aplicación correcta en las máquinas modernas es de gran importancia para todos los usuarios de maquinaria eléctrica. La correcta aplicación y selección de las escobillas, conjuntamente con el adecuado cuidado, retorna en el mejoramiento del comportamiento de la máquina, menos dolores de cabeza debidos al mantenimiento, menos costosos tiempos de detección. Lo que se quiere hacer entender es que la vida útil de las escobillas depende de factores muy diversos. Factores estrechamente inter-relacionados. Siempre se habla, por ejemplo, de una escobilla que puede durar un millón de kilómetros. Cómo puede durar tanto, se preguntarán Uds. No es que un ferrocarril va recorrer un millón de kilómetros, sino que el recorrido que haría la escobilla sobre el colector sería de un millón de kilómetros. La fórmula es sencilla: $Km = \text{Diámetro del Colector} \times \text{Revoluciones por minuto} \times \text{tiempo de trabajo} / 2$. Si igualamos la distancia a 1.000.000 de Km., obtendremos que el Tiempo, que es la vida útil de la escobilla, es: $\text{Tiempo (en meses)} = 7368.28 / (\text{RPM} \times \text{Diámetro del Colector})$. Así, para un motor que gire a 1500 r.p.m. y tenga un diámetro del colector de 0.30 m, el tiempo aproximado de duración de la escobilla se sitúa en los 16 meses, en condiciones normales de operación. Esto demuestra que la escobilla

realmente es un elemento barato para lo que le toca recorrer. La idea de esto no es que le calculen los kilómetros de vida a cada escobilla; lo que se intenta decir es que por lo menos hay dos factores importantes que inciden la vida de la escobilla como son el diámetro y la velocidad angular (las R.P.M.). En dos máquinas semejantes, tendrá mayor vida útil aquella que su colector vaya más despacio o a la inversa, en dos colectores que giren a la misma velocidad, tendrá mayor vida útil la escobilla que esté en el colector de menor diámetro. Todo esto sin entrar a considerar cuestiones tales como el ambiente, la presión, la densidad de corriente o el grado de la escobilla. De tal manera que, las escobillas de una máquina que trabaje, por ejemplo, en una fábrica de plásticos durante las 24 h del día, con altas revoluciones y que tenga una vida de 3 meses, es una escobilla con una vida “aceptable”. En un generador de corriente continua, una escobilla de 3 meses no se puede decir que sea buena. Podemos decir que, de una manera general, la vida útil de una escobilla debería situarse por encima de los 6 meses. También se debe desconfiar de la escobilla de 2 o 3 años (en trabajo continuo) ya que puede estar desgastando el colector. Tendrá una escobilla con vida útil excelente, pero al mismo tiempo tendrá un colector o un anillo dañado o rayado que le va a costar mucho más repararlo.

1.3.4 La Chispa en la interacción Catenaria-Pantógrafo

Si colocamos un clip o un conductor en una toma corriente se produce un cortocircuito, pero sin vez de ello colocamos una plancha, no se produce un corto, ni un incendio, precisamente debido a que la plancha tiene una resistencia eléctrica que limita el paso de la corriente. Así mismo, si las escobillas tienen una resistencia eléctrica asociada, estas escobillas limitan el paso de la corriente o de la chispa. De tal forma, cuando le mencionen que esta escobilla es muy buena para la conmutación, quiere decir que es una escobilla que tiene una resistencia eléctrica importante. Así se puede concluir rápidamente, que las escobillas Metalgráficas no sirven para la conmutación. Comparemos una escobilla Electrográfica típica de $4000\mu\text{OHMs}\times\text{cm}$ de resistividad, buena para la conmutación con una metalgráfica de 20 ó $40\mu\text{OHMs}\times\text{cm}$, cuya capacidad de limitar la corriente de corto circuito es nula.

Esta escobilla haciendo el trabajo de la Electro-grafítica sería una fuente de chispas. De ahí que la capacidad de conmutación de una escobilla está directamente relacionada con la resistencia del material. La caída de contacto, tal como debe llamarse a la resistencia que se produce entre el colector y la escobilla y que depende de la resistividad del material del que se está tratando, y de la corriente transferida, opone una resistencia al paso de la corriente de conmutación y así tiene un efecto amortiguador, pero que es siempre reducido, comparado con el de los polos auxiliares. Dicho de otra manera, la compensación por la escobilla, completa la compensación por los polos auxiliares pero no puede reemplazarla. Ahora, éste no es el único elemento que puede responder por el buen funcionamiento de una escobilla, en lo que tiene que ver con la conmutación. La máquina también tiene sus ayudas para poder realizar ese trabajo de conmutación rotativa sin chispa.

1.4 Modelos para la representación de la Catenaria-Pantógrafo.

Modelo simplificado, discreto y completo

La mayoría de los modelos simplificados que existen representan la Catenaria como un sistema de masa y rigidez variable y el Pantógrafo como un sistema masa, muelle-amortiguador de uno o dos grados de libertad. Son por lo tanto sistemas unidimensionales en los que básicamente se pierde información sobre la propagación de ondas transversales en el hilo de contacto. Estos modelos entonces pueden aportar información de tipo cualitativo y cuantitativo sobre el comportamiento de la Catenaria.

Modelo discreto

Definido por la norma PREN 50318 como un sistema de dos grados de libertad, el Pantógrafo se modela mediante dos resortes con constantes de rigidez k_1 y k_2 , dos masas m_1 y m_2 y dos amortiguadores c_1 y c_2 , el modelo será el siguiente definido en el artículo: (López, 2004).

Modelos completos

La mayoría de los modelos completos utilizan la técnica de los elementos finitos, sin embargo en los últimos años existen otras formas de afrontar la resolución de este problema mediante soluciones analíticas, planteamiento de

dinámica multicuerpo o resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales algebraicas. El principal problema de los modelos de elementos finitos es su elevado costo computacional. (López, 2007).

1.5 Métodos que se emplean para la supervisión y control de catenarias:

1. Método manual: Muy costoso, se utiliza para realizar mediciones puntuales solo en un tramo. Consiste en medir la reducción del diámetro de la catenaria.
2. Método de Microondas.
3. Método de medición del campo magnético. Consiste en medir el campo magnético que produce un conductor cuando a través de este circula una corriente eléctrica.
4. Método (óptico), análisis y procesamiento de imágenes. Es el de mayor uso actualmente y todas las compañías ferroviarias están optando por este método.(Borromeo, 2004)

1.6 Redes Neuronales Artificiales

El uso de las redes neuronales ofrece muchas propiedades y capacidades, como el aprendizaje adaptativo, auto organizativo, funcionamiento en paralelo en tiempo real y tolerancia de fallos por la codificación redundante de la información. Desde punto de vista de solucionar problemas, las redes neuronales son diferentes de los ordenadores convencionales que usan algoritmos secuenciales, mientras que las redes neuronales actúan como el cerebro humano, procesando la información en paralelo, y también pueden aprender y generalizar a casos nuevos que no estaban incluidos durante el proceso del diseño. Las redes neuronales pueden procesar las informaciones más rápido que los ordenadores convencionales.

1.6.1 Arquitectura de las redes neuronales artificiales

Si bien la red neuronal artificial (ANN) es la unidad principal, no menos importante es como se interconectan entre ellas para formar una red que procese la información. Se refiere a la arquitectura como las diferentes formas de interconectar esas unidades básicas creando redes de topología diferentes

Pueden existir un sin número de posibles combinaciones de las conexiones entre ellas, sin embargo podemos definir algunas estructuras fundamentales.

Redes neuronales artificiales de propagación hacia delante feedforward

Este tipo de estructuras se organiza en un grupo de neuronas que procesan la información de las entradas paralelamente y luego las salidas de las neuronas pueden combinarse para obtener unas salidas de la red o alimentar otro grupo de neuronas. La figura 1.5 muestra una estructura de red neuronal de una sola capa de salida. La figura 1.6 muestra una estructura de red neuronal multicapa (MFANN) que contiene una o más capas ocultas. Normalmente, las entradas se conectan a la primera capa oculta. La salida de cada neurona se conecta a las entradas de las neuronas de la siguiente capa hasta alcanzar a la capa de salida.

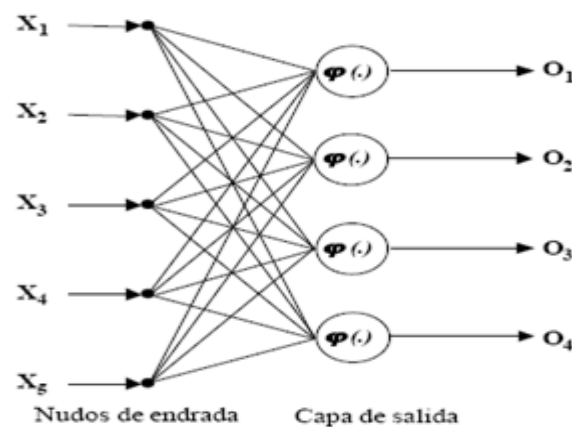


Figura 1.5 Red de propagación de una capa

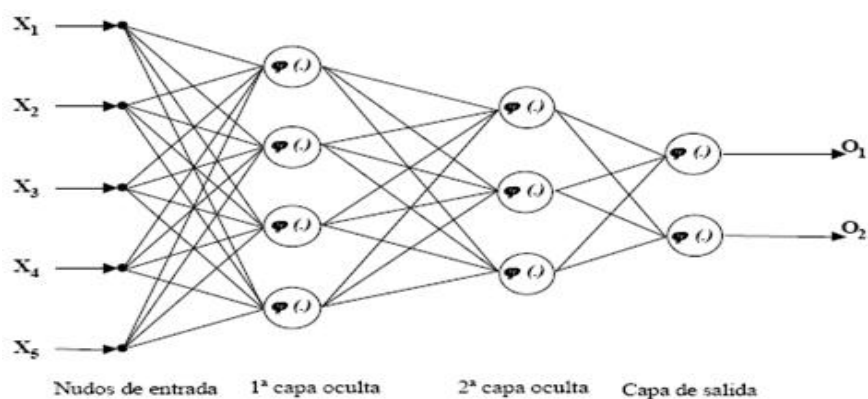


Figura 1.6 Red de propagación multicapa

Red de Hopfield

Algunas de las arquitecturas de redes neuronales se caracterizan por el hecho de que varias de sus entradas están realimentadas por salidas de la propia red neuronal. La red propuesta por Hopfield es un ejemplo de estas arquitecturas incluyendo su propio modelo de neurona, como se presenta en la sección anterior. La figura 1.7 ilustra un esquema de una de las posibles combinaciones de redes Hopfield.

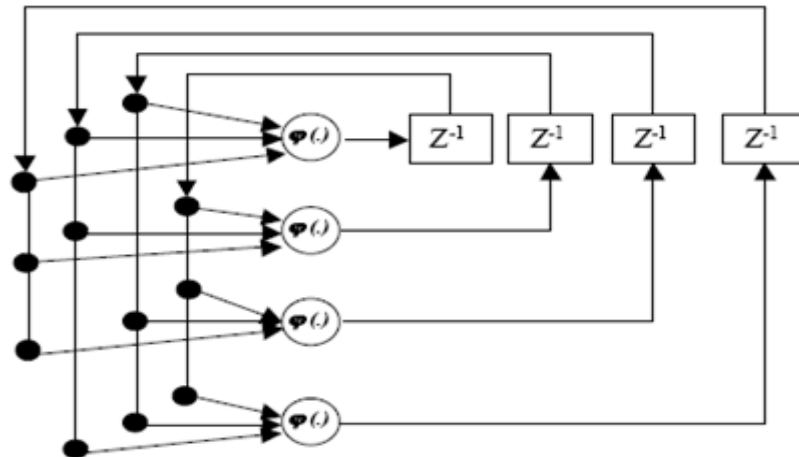


Figura 1.7 Red neuronal de Hopfield

Red neuronal artificial de propagación con retardos de tiempo

La red neuronal artificial con retardos de tiempo (TDANN) se plantea de forma básicamente similar a la red MFANN con sola diferencia de organizar los datos de entrada, es decir que cada entrada está multiplexada para ser una función de unidades del retardo del tiempo. Los algoritmos de entrenamiento y actualización son exactamente iguales sin embargo, en las entradas se añaden unos valores iguales a los retardos de tiempo de la entrada. La figura 1.8 ilustra una red neuronal artificial de propagación con retardos de tiempo.

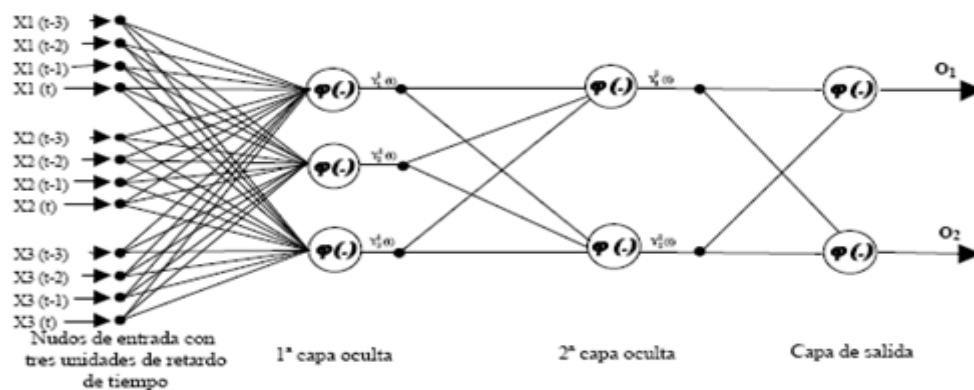


Figura 1.8 Red neuronal artificial de retardo de tiempo con tres unidades de retardo de tiempo en los nudos de la entrada

Red neuronal artificial de respuesta de impulso finito

La red neuronal artificial de impulso finito (FIRANN), es una forma compleja de la MFANN, en la cual cada entrada de cada neurona depende de la salida actual y de los valores previos de las neuronas de la capa anterior. La figura 1.9 muestra la red FIRANN.

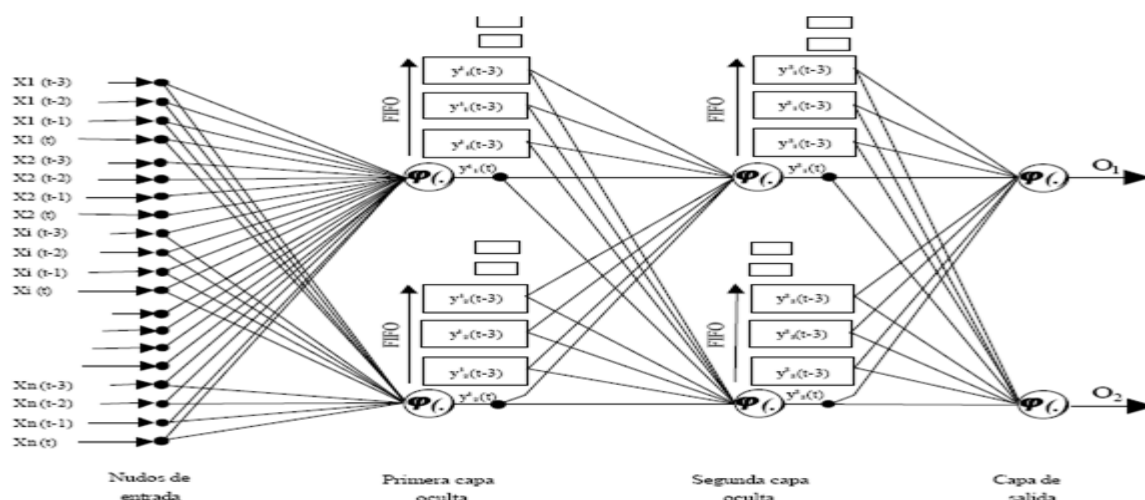


Figura 1.9 Red neuronal artificial de respuesta de impulso finito FIRANN

1.6.2 Factores que afectan al entrenamiento en las redes neuronales

El entrenamiento es un “proceso de acción complejo cuyo objetivo es influir de forma sistemática y orientada al objetivo, sobre el desarrollo de la persona. En este caso es un proceso que determina los pesos sinápticos óptimos que hacer que la evolución del error decrezca a un valor mínimo. Es decir que el entrenamiento de una red neuronal debe detenerse cuando el error se vuelve constante y no puede ser reducido, lo que significa que el proceso de entrenamiento ha alcanzado un mínimo local o global. Por tanto no podemos saber si el error está en mínimo local o en un mínimo global. El problema ahora es como saber si se trata de un mínimo local o global. Esta pregunta es muy difícil de responder. Una respuesta podría ser que mediante la prueba de generalización de la red neuronal y otra que mediante el entrenamiento de la

red con diferentes grupos de condiciones iniciales y factores de aprendizaje hasta lograr un error mínimo.

1.6.3 Los parámetros de función de activación sigmoidea

De acuerdo con expresión de la función sigmoide, resulta evidente que los parámetros a y c se utiliza para elegir el tipo de función (sigmoide simétrica o sigmoide asimétrica) y el parámetro γ se utiliza para cambiar la pendiente de la función. Estos parámetros tienen que seleccionarse cuidadosamente antes de iniciar el proceso del entrenamiento.

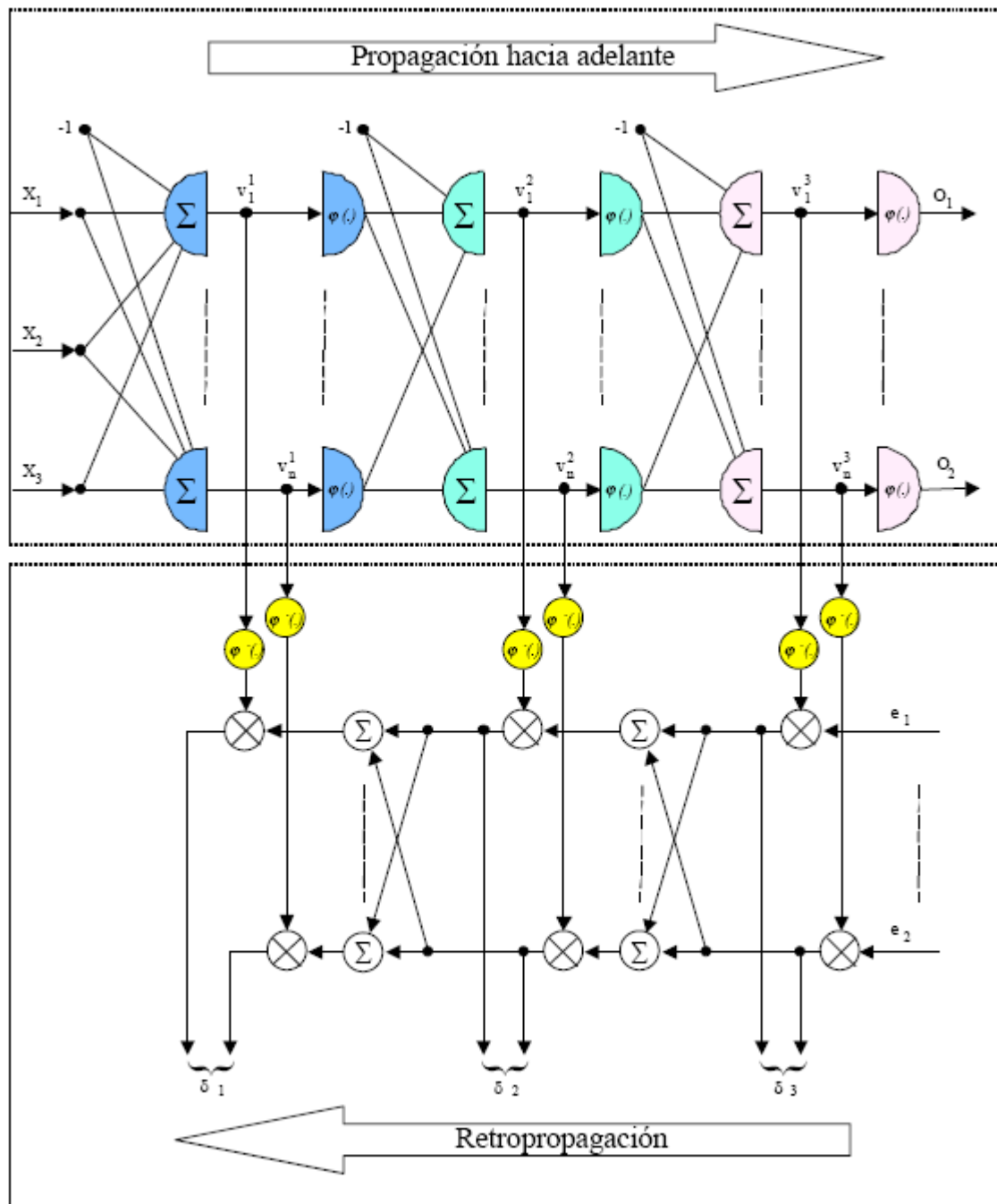


Figura 1.10 Diagrama esquemático de la propagación hacia adelante y propagación hacia atrás

El factor de aprendizaje

El aprendizaje es un cambio permanente de la conducta de la persona como resultado de la experiencia. Se refiere al cambio en la conducta o al potencial de la conducta de un sujeto en una situación dada, como producto de sus repetidas experiencias en dicha situación.

Resulta evidente que el factor del aprendizaje se utiliza para reducir el error de aprendizaje y además depende directamente del problema a solucionar. Si se deja el factor de aprendizaje constante, quizás el entrenamiento salte a un mínimo global o caiga en un mínimo local. Hay algoritmos para resolver estos problemas tales como el que reduce el factor de aprendizaje después cada iteración, multiplicándolo por un valor, adaptación del factor de aprendizaje y a base de la regla aprendizaje Delta-Bar-Delta, que se usa en este trabajo.

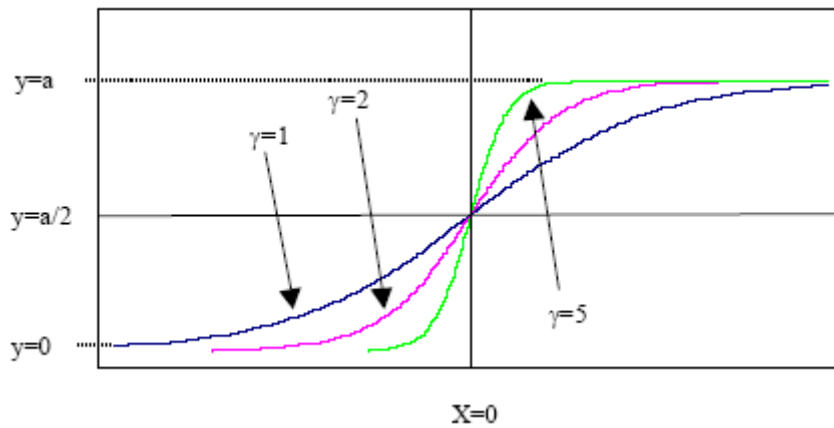


Figura 1.11 Función sigmoidea asimétrica

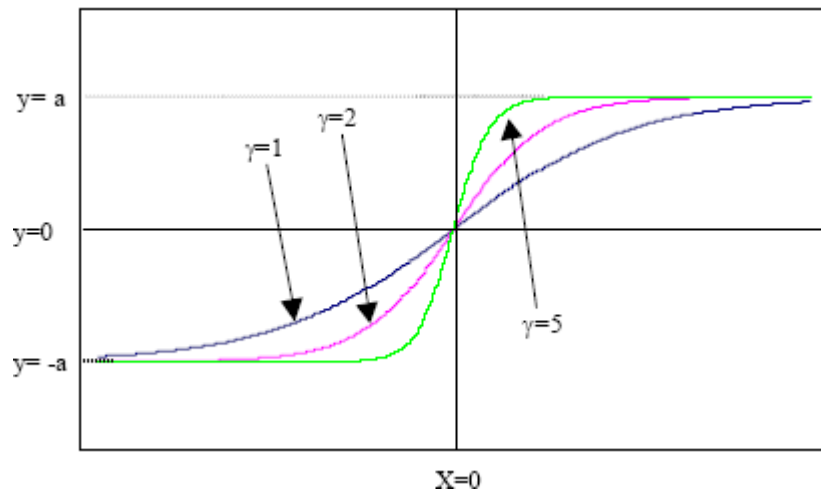


Figura 1.12 Función sigmoidea simétrica.

Regla de aprendizaje Delta-Bar-Delta

Con este método el factor de aprendizaje se introduce como una función del error de aprendizaje. La ecuación se puede escribir como:

$$\nabla w_{ji}^{(l)}(n) = \eta_{ji}(n+1) \delta_j^{(l)}(n) y_i^{(l-1)}(n) \quad (1.1)$$

Donde $\eta_{ji}(n+1)$ es el factor de aprendizaje actualizado. El nuevo factor de aprendizaje se define como:

$$\eta_{ji}(n+1) = \eta_{ji}(n) + \nabla \eta_{ji}(n+1) \quad (1.2)$$

Donde

$$\nabla \eta_{ji}(n+1) = \begin{cases} k & \text{si } S_{ji}(n-1)D_{ji}(n) > 0 \\ -\beta \eta_{ji}(n) & \text{si } S_{ji}(n-1)D_{ji}(n) < 0 \\ & \text{o para otros casos} \end{cases} \quad (1.3)$$

Y

$$D_{ji}(n) = -\sum_{b=1}^B \delta_j^{(b)}(n) y_i^{(b)}(n) \quad (1.4)$$

Y

$$S_{ji}(n) = (1 - \xi)D_{ji}(n-1) + \xi S_{ji}(n-1) \quad (1.5)$$

donde $D_{ji}(n)$ es el valor actual de la derivada parcial de la superficie de error respecto del peso

$w_{ji}(n)$ y $S_{ji}(n)$ es una suma ponderada exponencialmente de los valores de las derivadas actuales y anteriores de superficie del error respecto del peso $w_{ji}(n)$ con ξ como base y el número de iteración como exponente.

La regla de aprendizaje “Delta-Bar-Delta” tiene otra ventaja, además de acelerar el proceso del aprendizaje y evitar los mínimos locales, reduce la influencia de la inicialización de los pesos.

El factor “momentum”

Para hacer el proceso del entrenamiento mas rápido y para asegurarse de escapar de los mínimos locales sin incrementar el error después de haberlo reducido, se puede escribir como:

$$w_{ji}^{(l)}(n+1) = w_{ji}^{(l)}(n) + \nabla w_{ji}^{(l)}(n) + \alpha(w_{ji}^{(l)}(n) - w_{ji}^{(l)}(n-1)) \quad (1.6)$$

Donde α es el factor momentum, que tiene un valor positivo menor que la unidad. El momentum también se puede actualizar usando la misma base mencionada en el algoritmo de actualización del factor de aprendizaje Delta -- Bar -Delta.

1.6.4 Inicialización

La inicialización es el primer proceso del entrenamiento de la red neuronal. Una buena selección de los valores iniciales de los pesos sinápticos y de los umbrales pueden ayudar enormemente en el diseño satisfactorio de la red y su entrenamiento. La inicialización de los pesos sinápticos y los umbrales deben distribuirse uniformemente en un rango pequeño para reducir la probabilidad de saturación de las neuronas en la red. Sin embargo, el rango no debe ser muy pequeño ya que puede originar que los gradientes del error sean inicialmente muy bajos, y el aprendizaje muy reducido.

Método de validación cruzada

Si se usan todos los patrones posibles en proceso del entrenamiento, no se puede decir que la red neuronal artificial generalizará. Por esto, usando el método de validación cruzada, se puede saber si la ANN puede generalizar o no y evitar sobre entrenamientos. Esto puede lograrse mediante una selección aleatoria de un 60% o 80% de los patrones disponibles como grupo de entrenamiento y el resto dejarlo para la prueba. Después de un cierto número de iteraciones, se detiene temporalmente el proceso de entrenamiento y se usa el grupo de prueba para ensayar la red neuronal. Repitiendo esto a lo largo de todo el proceso de entrenamiento se deberá reducir el error de prueba hasta un cierto instante, después del cual el error de prueba empezará a incrementarse de nuevo. El punto que corresponde con el mínimo error es el mejor ajuste de la red neuronal artificial.

1.6.5 Entrenamiento de las redes neuronales artificiales

Para simplificar el entrenamiento, los umbrales o las polarizaciones se asumirán como unas entradas fijas a la neurona (1 o -1) a través de un peso sináptico adaptable. Por tanto, la red neuronal durante la operación de propagación hacia adelante puede explicarse tal como se muestra en la figura 1.9.7.6

La señal de error instantáneo a la salida de la neurona j en la iteración n de un ciclo de entrenamiento es:

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (1.7)$$

donde :

d_j = la salida deseada de la neurona j .

y_j = la salida real de la neurona j .

Usando la suma instantánea de los errores cuadráticos E de la red:

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n) \quad (1.8)$$

Donde c incluye todas las neuronas en la capa de salida de la red

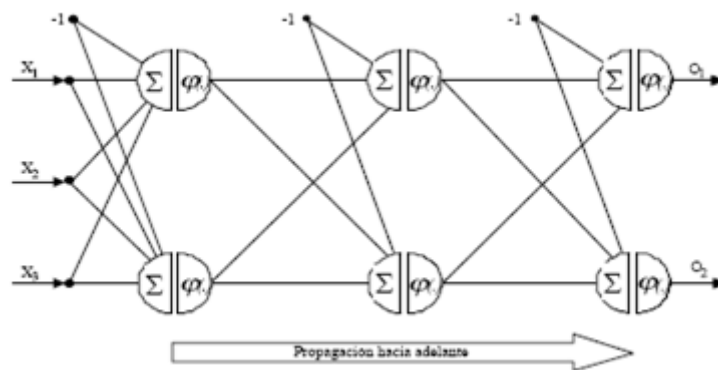


Figura 1.13 Proceso de propagación hacia delante de una estructura de red

De las ecuaciones (1.6) a (1.8) resulta evidente que los valores de los pesos están incluidos en $E(n)$. Esto significa que los valores de los pesos deben ser seleccionados para minimizar el error de la salida total de la red. Esto puede lograrse mediante las derivadas parciales del error $E(n)$ respecto a cada peso

sináptico, lo que da el gradiente instantáneo que finalmente lleva al cambio de los pesos sinápticos, Δw , y que minimiza el error de la salida al final del proceso de entrenamiento. Se muestra un resumen del entrenamiento para un diagrama estructural de una MFANN durante el proceso de propagación y de retropropagación. El procedimiento de entrenamiento se resume como en los siguientes pasos:

1. Generar los datos de pares entrada y salida de la tabla para diferentes condiciones de operación.
2. Con la red inicialmente sin entrenar, es decir con los pesos seleccionados aleatoriamente, la señal de salida será totalmente diferente a la esperada para una entrada conocida.
3. Proceso de propagación hacia adelante: se selecciona de la tabla una pareja de datos de entrada y salida $[x(n), d(n)]$. para un patrón de entrada, se calcula la salida de la red y se compara con la salida deseada para obtener el error. calcular las funciones de activación a través de los procesos de propagación hacia adelante capa tras capa. el nivel de actividad de la red, v , puede escribirse como

$$v_j^{(l)}(n) = \sum_{i=1}^p w_{ij}^{(l)}(n) y_i^{(l-1)}(n) \quad (1.9)$$

Donde:

$v_{lj}(n)$ = la actividad interna de la red de la neurona j , en la capa l , en la iteración n .

$y_i(n)$ = la salida de la i -ésima neurona en la capa $l-1$ que conecta a la neurona j con la siguiente capa a través del peso sináptico w_{ij} .

i = la neurona fuente.

j = la neurona receptor.

La salida y de la neurona es:

$$y_j^{(l)}(n) = \varphi(v_j^{(l)}(n)) \quad (1.10)$$

Donde φ es la función de activación.

Supuesto el uso de función asimétrica o simétrica sigmoidea, la señal de la salida de la neurona j en la capa l es:

$$y_j^{(l)} = \frac{a}{1 + e^{-\gamma \cdot v_j^{(l)}(n)}} + c \quad (1.11)$$

Donde a, c y γ son parámetros. Estos parámetros afectan directamente al problema que se va resolver. Haciendo $c=-1$ y $a=2$ se obtiene la función sigmoide simétrico (tangente hiperbólica), mientras $c=0$ y $a=1$ se tendrá la función sigmoide asimétrica. Estos parámetros deben seleccionarse cuidadosamente antes de iniciar el proceso del entrenamiento.

Si la neurona j está en la primera capa oculta ($l=1$), se hace:

$$y_j^{(1)}(n) = x_j(n) \quad (1.12)$$

Sin embargo, si la neurona j es en la capa de la salida ($l=L$), se hace

$$y_j^{(L)}(n) = o_j(n) \quad (1.13)$$

Proceso de retropropagación: Cabe señalar que el algoritmo que indica como minimizar la función del error es conocido como "Algoritmo de Retropropagación".

Los errores de la salida y en las capas oculta de la red se usan para calcular el gradiente local en la capa de salida l. Este gradiente es retropropagado hacia los nudos de entrada capa a capa, como ha mostrado en la figura 1.12, aplicando las siguientes ecuaciones:

para la neurona j en la capa de la salida L

$$\delta_j^{(L)}(n) = e_j^{(L)}(n) o_j(n) (1 - o_j(n)) \quad (1.14)$$

Para la neurona j en la capa oculta l

$$\delta_j^{(l)}(n) = y_j^{(l)}(n)(1 - y_j^{(l)}(n)) \sum_k \delta_k^{(l+1)}(n) w_{kj}^{(l+1)}(n) \quad (1.15)$$

Donde w_{jk} es el peso sináptico que conecta la neurona j en la capa l a la neurona k en la capa $l+1$.

Usando el gradiente local calculado por cada capa, el incremento de un peso sináptico puede calcularse como:

$$\nabla w_{ji}^{(l)}(n) = \eta \delta_j^{(l)}(n) y_i^{(l-1)}(n) \quad (1.16)$$

Donde η es factor de aprendizaje, que un valor positivo menor que la unidad. Sumando cada cambio en el peso a su correspondiente valor usado en etapa de propagación se obtendrá en nuevo valor del peso:

$$w_{ji}^{(l)}(n+1) = w_{ji}^{(l)}(n) + \nabla w_{ji}^{(l)}(n) \quad (1.17)$$

Con el error se calculan y ajustan los pesos de la red usando el algoritmo de retropropagación de tal forma que el nuevo error sea menor.

1. Se repite el paso anterior con cada conjunto de datos de entrada y salida hasta que el error para todo el conjunto del entrenamiento converja por debajo de un valor fijado.
2. Después del entrenamiento se prueba el comportamiento de la red neuronal fuera del control con un grupo arbitrario de entradas para asegurarse que el entrenamiento fue exitoso.

1.6.6 Implementación de las redes neuronales

Las redes neuronales durante la operación normal de propagación hacia adelante usan sólo dos operaciones matemáticas, la suma y la multiplicación, y las funciones sigmoideas y/o lineales. Cada neurona puede tener sus propios parámetros de la función sigmoidea. En este trabajo, las redes neuronales se entrenaron teniendo en cuenta que las neuronas en cada capa deben tener las mismas parámetros para facilitar la implementación de la misma. La implementación de las redes neuronales se hace de diferentes maneras:

- a) Mediante un chip de red neuronal analógica entrenada electrónicamente "ETANN" (Electronically Trainable Analog Neural Network). El sistema

de entrenamiento de red neuronal montado en un Intel (The Intel's Neural Network Training System) "iNNTS" se empleó para configurar la red neuronal "rala" para la generación de los ángulos de conmutación primarios].

- b) Mediante una tarjeta DSP ("Digital Signal Processing") grabando la función sigmoide en una EPROM. Este tipo tiene como aspecto negativo el elevado tiempo de respuesta de la red, especialmente si se trata de una red grande. Para solucionar este problema, se puede implementar la red neuronal usando una tarjeta DSP por cada capa, especialmente cuando cada capa tiene su propia función de activación.
- c) Usando tarjetas de redes neuronales que usan neuroprocesadores como la SAND y la SIOP [41]. En la tarjeta SAND una capa oculta puede tener hasta 512 neuronas y la función de activación hay que almacenarla en una EPROM y tiene que ser la misma para toda la red. La tarjeta SAND está diseñada para implementar las redes neuronales MFANN, RBF y Kohonen. En la tarjeta SIOP su capacidad esta limitada a la función sigmoidea esta implementada en la misma tarjeta y es la misma para toda la red. La tarjeta SIOP tiene un tiempo total de propagación de 2,52 μ s y con ella se pueden implementar las redes MFANN y las redes recurrentes.
- d) Usando matrices de microprocesadores de 16 bits. En este caso el tiempo de propagación se puede disminuir mucho poniendo un microprocesador por cada neurona y poniendo una EPROM que tenga la tabla de la función sigmoidea para cada microprocesador y otra para las matrices de los pesos. Esta configuración tiene la ventaja de ser de respuesta muy rápida y de cumplirse la idea básica de las redes neuronales, el procesamiento en paralelo de la señal o imagen. Otra configuración de este tipo de implementación es poner una matriz de una sola columna de microprocesadores cuyo número sea igual al mayor número de neuronas en cualquier capa y en cada caso del proceso de propagación, esta columna emule una capa concreta de la red neuronal (Manual de redes neuronales, 2001).

1.7 Generalidades sobre el diseño de sistemas catenaria – pantógrafo

Cuando se aborda el diseño de una Catenaria, el problema es el dimensionamiento del pendolado. Desde un punto de vista de cálculo de estructuras, este constituye un caso llamado problema de equilibrio inicial, entonces este problema requiere la definición de la geometría inicial y de las tensiones internas en la estructura que son a priori desconocidas. Esto hace que las técnicas de cálculo de elementos finitos, que se muestran tremendamente eficientes en otros campos, presenten problemas de convergencia y poca robustez cuando se emplean en este tipo de cálculos. El problema se ha resuelto tradicionalmente empleando aproximaciones de tipo parabólico y diversas hipótesis sobre la posición de los extremos de la Catenaria, hoy en día puede resolverse mediante la formulación exacta de las ecuaciones de la Catenaria y la resolución del problema no lineal resultante. Mediante esta técnica se puede realizar el cálculo del pendolado de seccionamientos, cantones no uniformes, u obtener la rigidez estática de una Catenaria sin tener que realizar hipótesis simplificadoras en cuanto al comportamiento de la misma. Desde el punto de vista puramente tecnológico el contacto entre el patín del Pantógrafo y la Catenaria es clave para un buen suministro eléctrico al material rodante. La simulación y el análisis del fenómeno permiten mejorar el diseño de Pantógrafos y obtener Catenarias que puedan ser circuladas a velocidades mas elevadas sin que aparezcan despegues entre los dos elementos u obtener mejores diseños, ya sea por simplicidad de montaje, disminución de costos, etc. En cambio desde una perspectiva computacional la simulación resulta compleja y costosa de modelar. El método mas extendido es el de los elementos finitos, sin embargo este método es muy costoso si se quieren hacer análisis de sensibilidad, estudios paramétricos o cálculos preliminares por este motivo se han desarrollado modelos simplificados que tratan de capturar gran parte de la física del problema, y por lo tanto obtener resultados muy razonables sin ser computacionalmente muy exigentes. Todo este software debe estar validado por la norma EN-50318.

1.8 Descripción de la Catenaria del sistema ferroviario “General Ezequiel Zamora”

El sistema ferroviario “General Ezequiel Zamora” tiene un alcance de 40 Km, uniendo la ciudad de Caracas, Charallave y Cúa. Esta línea no es uniforme, esta dividida en dos tramos, y posee dos hilos uno superior llamado sustentador y otro inferior llamado propiamente hilo de contacto.

En Charallave Norte, esta localizada la subestación la cual toma tensiones trifásicas de 115 KV de la red nacional y la transforma con 2 transformadores de 35/40 MVA conectados en paralelo, a tensiones de 25 KV de tensión monofásica desfasadas 90 grados.

Caracas – Charallave Norte:

Longitud: 23,8 Km.

Estación inicio: Caracas

Estación intermedia: ninguna

Pendiente máxima: 2,4 % en subida hacia Caracas

Desnivel total: 508 m.

Charallave Norte – Cúa:

Longitud: 16,4 Km.

Estación inicio: Charallave Norte

Estación intermedia: Charallave Sur

Pendiente media: 1,1 % en subida hacia Charallave

Desnivel total: 183 m.

El hilo de contacto es de 107 mm², sección del alimentador de 280 mm², se presentan en terrenos no planos y la topología es: al aire libre, sobre viaducto y en galería.

Conclusiones parciales

- Se estableció la base teórica de la investigación mediante el análisis de la problemática actual en el sistema ferrocarrilero “General Ezequiel Zamora”.
- Se concluye que existen investigaciones basadas en el cálculo analítico del contacto Catenaria-Pantógrafo; pero estas no son suficientes.

CAPÍTULO 2

MODELACIÓN Y PROPUESTA DE SISTEMA DE SUPERVISIÓN

Se realiza la modelación y la simulación del sistema Catenaria – Pantógrafo, perteneciente al sistema ferroviario de Los Valles del Tuy “General Ezequiel Zamora”, a partir de modelos ya establecidos a nivel mundial. Como resultado se obtiene una serie de curvas que validan el diseño de la Catenaria. Seguidamente se diseña un programa supervisor, que emplea como herramienta las redes neuronales y permite realizar el estudio para la adquisición y procesamiento de imágenes, a partir de la elaboración de patrones. Este supervisor se encargará de manipular una base de datos formada por imágenes captadas mediante una cámara digital e identificar en estas imágenes los patrones apropiados para determinar si el funcionamiento del sistema es adecuado o no.

2.1 Evaluación del sistema ferroviario “General Ezequiel Zamora”

Se procede a verificar las variables: rigidez, masa, y fuerza con el fin de determinar si su influencia se encuentra bajo normas internacionales, basándome en el modelo simplificado de la interacción Catenaria-Pantógrafo del Dr. Alberto Carnicero López. En este el sistema Catenaria-Pantógrafo esta estructurado de la forma que muestra la figura 2.1, y su modelo se representa en la figura 2.2 y figura 2.3 respectivamente. Obteniéndose de estos modelos las ecuaciones respectivas las cuales se utilizaran para la evaluación.

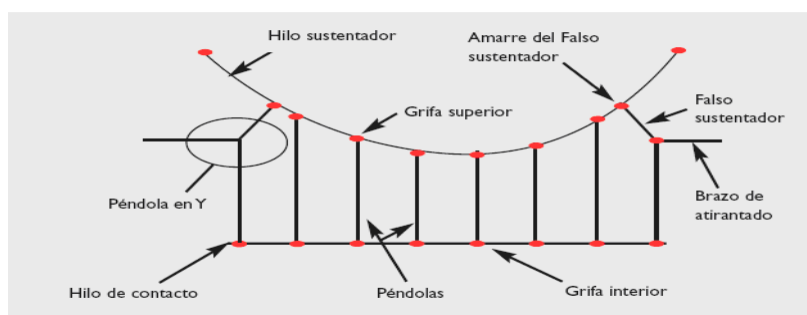


Figura 2.1 Elementos de una Catenaria.

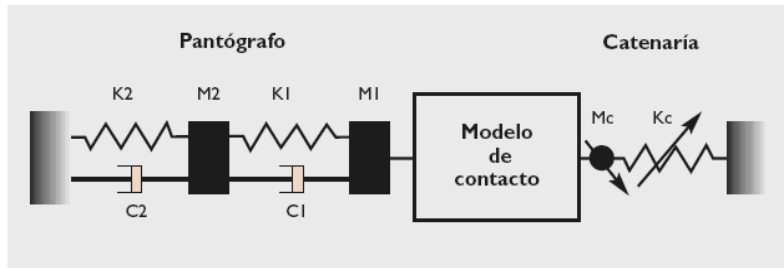


Figura 2. 2 Modelo del sistema Catenaria-Pantógrafo

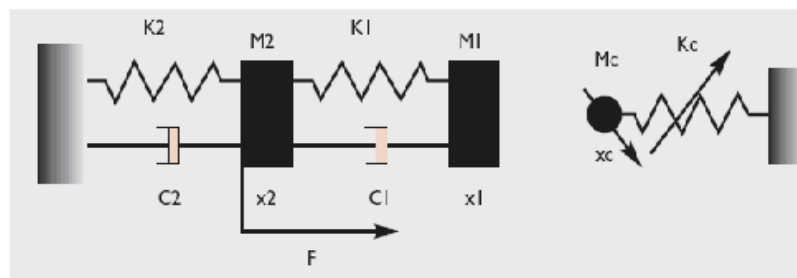


Figura 2.3 Sistema Catenaria-Pantógrafo desacoplado.

Para la modelación del contacto se emplea un modelo lagrangiano que prácticamente resuelve los problemas del método del penalti, y en este caso no introduce ningún problema adicional importante. Este impone la condición de contacto entre los dos cuerpos de forma exacta y se introduce en el sistema de ecuaciones, lo que obliga a la reformulación del mismo. Para obtener las ecuaciones que modelan el problema se determina un funcional de energía compuesto por un termino de energía cinética, T , otro de energía potencial (en este caso elástica, V), un termino disipativo viscoso, D , y por ultimo, un termino del trabajo de las fuerzas externas no conservativas, Q_{ext} . Por otro lado, la restricción que deberá cumplirse es la condición de impenetrabilidad, g . Las expresiones de estas energías se muestran en las ecuaciones siguientes.

La solución se obtiene minimizando el funcional de energía, F , condicionado por la restricción de impenetrabilidad.

$$\min F = \min \left(\frac{d}{dt} T + V + D - Q_{ext} \right) \quad \text{s.a. } g = (x_1 - x_c) \leq 0$$

El lagrangiano del sistema se forma añadiendo al funcional todas las restricciones que actúen sobre el problema multiplicadas por un coeficiente llamado multiplicador de Lagrange, y que en este caso tiene el significado físico de ser la fuerza de contacto.

$$L(x_1, x_2, x_c, \lambda) \leq 0 = \frac{d}{dt} T + V + D - Q_{\text{ext}} + \lambda \cdot g(x_1, x_c)$$

$$\min F = \min \left(\frac{d}{dt} T + V + D - Q_{\text{ext}} \right)$$

Derivando esta expresión con respecto a cada una de las variables y agrupando los términos se llega a un sistema de ecuaciones de la forma

$$T = \frac{1}{2} \dot{X}^T \cdot M \cdot \dot{X} = \frac{1}{2} \dot{X}_2^2 + M_1 \cdot \dot{X}_1^2 + M_c \cdot \dot{X}_c^2 \quad Q_{\text{ext}} = F \cdot X_2$$

$$V = \frac{1}{2} K_2 \cdot X_2^2 + K_1 \cdot (X_1 - X_2)^2 + K_c \cdot X_c^2$$

$$D = \frac{1}{2} C_2 \cdot \dot{X}_2^2 + C_1 \cdot (\dot{X}_1 - \dot{X}_2)^2 \quad g(X_1, X_c) = X_1 - X_c \leq 0$$

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{\lambda} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & G^t \\ G & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$M = \begin{bmatrix} M_2 & 0 & 0 \\ 0 & M_1 & 0 \\ 0 & 0 & M_c(x) \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} C_2 + C_1 & -C_1 & 0 \\ -C_1 & -C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_2 + K_1 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & K_1 & 0 \\ 0 & 0 & K_c(X) \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} k_2 & x_1 & x_c \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} F & 0 & D \end{bmatrix}^T$$

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Una vez cargadas estas matrices en Matlab con los valores respectivos del sistema se obtienen las siguientes curvas:

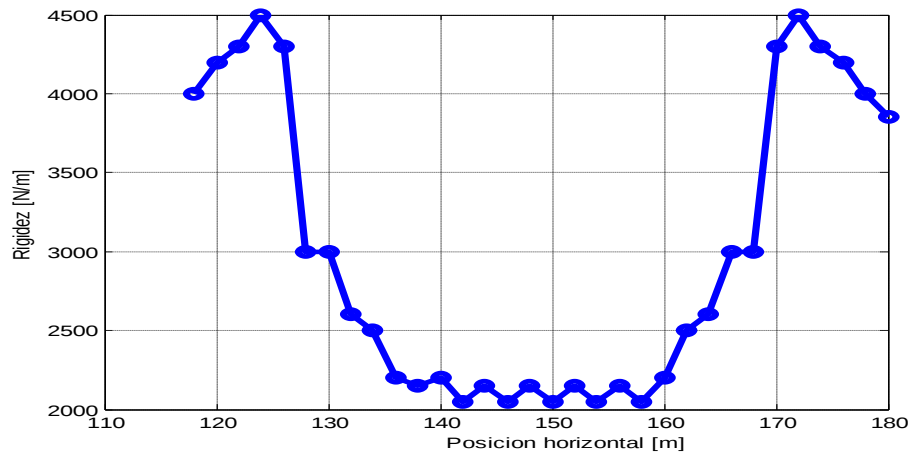


Figura 2.4 Posición horizontal (metros) Vs. Rigidez (newton metros)

Se puede notar en la Figura 2.4, que la rigidez aumenta a medida que se acerca a los puntos de sostén o postes en un cantón. Y disminuye a medida que se aleja de los extremos a un valor casi constante.

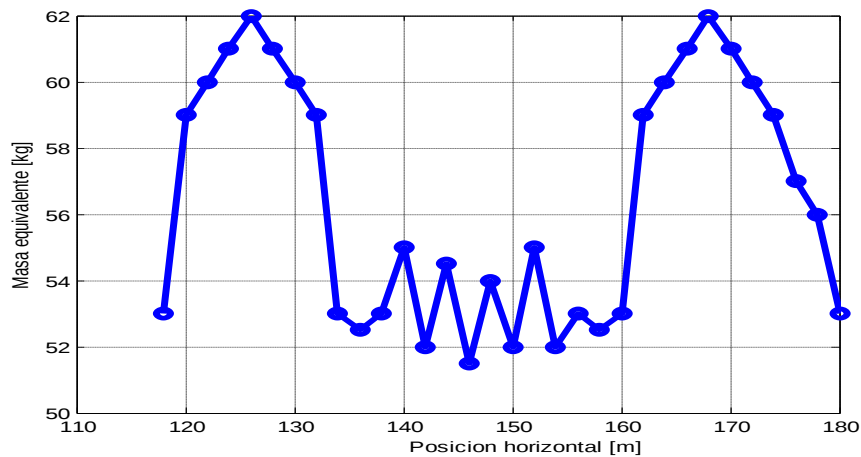


Figura 2.5 Masa equivalente en (Kg.) Vs. Posición (en metros)

Se puede notar en la Figura 2.5, que la masa de la Catenaria es menor hacia el centro, o cuando el Pantógrafo se aleja de los extremos.

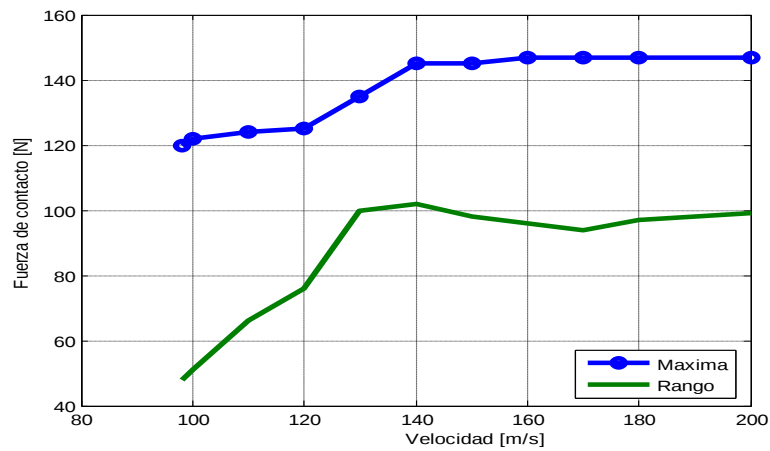


Figura 2.6 Velocidad en (m/s) Vs. Fuerza de contacto (Newton)

Se puede notar en la Figura 2.6, que para un rango de velocidades entre 100 y 200 m/s, la fuerza del contacto se mantiene entre 50 y 100 Newton. A medida que aumenta la Velocidad hasta un valor de 140 m/s la fuerza del contacto aumenta; a continuación tiende a mantenerse constante.

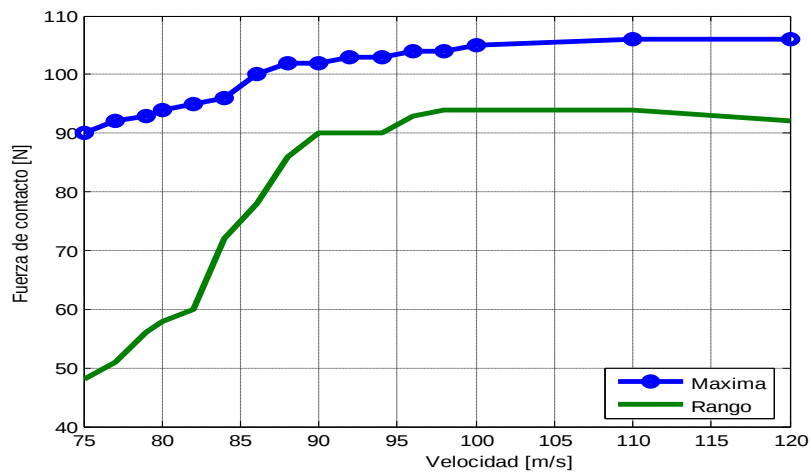


Figura 2.7 Velocidad en (m/s) Vs. Fuerza de contacto (Newton)

Se puede notar en la figura 2.7, que al seleccionar un rango de velocidades menores Entre 75 y 90 m/s, la fuerza de contacto se incrementa de 50 a 90

Newton, y luego se busca estabilizar en 92 Newton, cuando la velocidad aumenta de 95 a 120 m/s.

2.2 Propuesta de sistema de supervisión Catenaria-Pantógrafo

El método propuesto consiste en la colocación de una cámara y un sistema de iluminación sobre el techo del ferrocarril, para captar la imagen del contacto Catenaria- Pantógrafo, se ubica a dos metros del Pantógrafo y a un metro de la Catenaria, por medidas de seguridad. Este método se muestra en la figura 2.8.

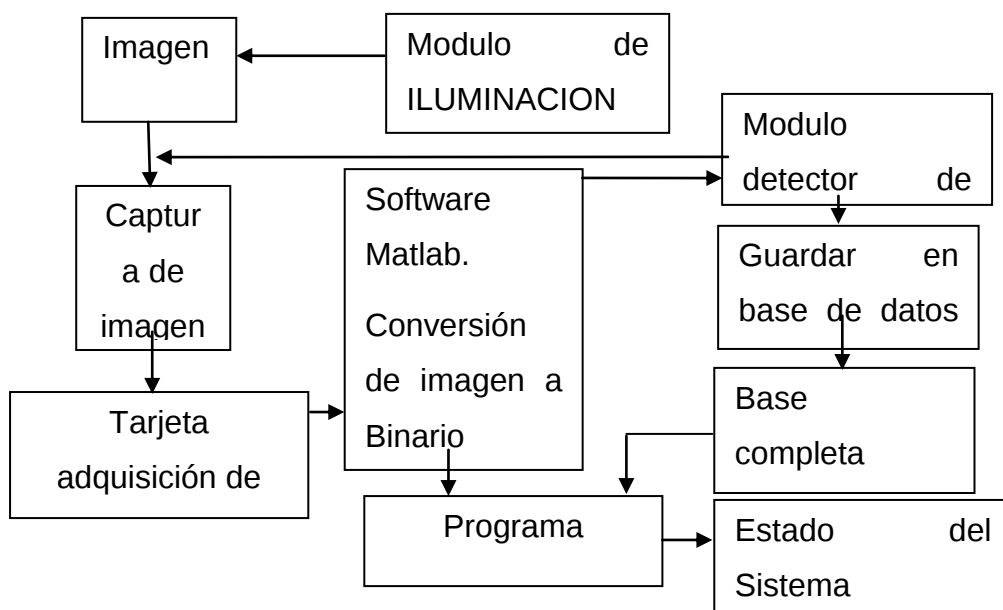


Figura 2.8 Esquema del proceso

El modulo de iluminación tiene por utilidad, que las imagen a ser captada posea la intensidad de luz adecuada, el modulo de captura de imagen estará en este caso, formado por un sistema digital (la cámara), la imagen capturada será enviada a una tarjeta de adquisición de datos de un computador marca Acer, a través de un software utilitario (Matlab), se convertirá la imagen capturada a un formato binario, si se determina que es un patrón a través del modulo detector de patrones, se guarda en la base de datos de patrones y en caso de que la base de patrones ya este completa , comenzara el proceso de capturar las imágenes y compararlas con la base de datos de patrones y obtendremos como resultado el estado o comportamiento del sistema. La interfaz con el usuario es realizado a través de un PC, que es el encargado del archivo,

postprocesado y presentación de los resultados, bien a través de informes o mediante gráficos como las proporcionadas en este caso. Pudiéndose generar informes estadísticos o alarmas donde existan zonas de gran desgaste o deformaciones.

Procedimiento:

- Identificación de los dispositivos de captación de imagen (señal)
- Configuración de los adaptadores (drivers)

La realización del método incluye:

- Acceso a los dispositivos y fuentes de video.
- Procesar con propiedades.
- Adquisición de imagen.
- Envío y almacenamiento de datos a memoria.
- Captura de imagen estática (foto)
- Adquisición del cuadro de la imagen.
- Adquisición de multicuadros.
- Vista de los datos.

De forma general el procesamiento de la imagen capturada se efectúa de la siguiente forma:

- Capturar el video
- Captura de la imagen estática (foto)
- Archivar en formato de doble arreglo (formato doble array)
- $A = \text{frameobj1 frameobj2 frameobj3}$
- Transformar a fourier
- Convertir a spectrum.

2.2.1 Supervisor Neuronal para el Sistema Catenaria-Pantógrafo

Leer Imagen, Convertir a Binario, si es un patrón, grabar en la base de datos de patrones, si no lo es pasar a leer nuevamente otra imagen, si la base de datos esta completa, realizar el proceso de comparar la imagen real capturada, con respecto a los patrones que están en la base de datos, y generar el estado del contacto.

En primer lugar para la captura de la imagen, se utilizó la herramienta Vfm del software utilitario Matlab, la cual nos permite el control de la imagen. El Toolbox de redes neuronales, y la herramienta Gui.

2.2.2 Sistema de diagnóstico desde los patrones

Para realizar esta etapa nos valemos de la herramienta Gui de Matlab, la cual permite crear una interfase como la mostrada abajo, en la cual fueron colocados dos botones, el botón aceptar permite la captura de la imagen para se luego procesada y mostrar con diferentes colores el desgaste del frotador del Pantógrafo, en este caso es un patrón, ya que no presenta desgaste alguno. Y el botón cerrar, en este caso es utilizado para salir del programa.



Figura 2.9 Ventana del programa donde se observa la imagen para el diagnóstico del contacto Catenaria-Pantógrafo del ferrocarril “General Ezequiel Zamora”, desde un patrón.

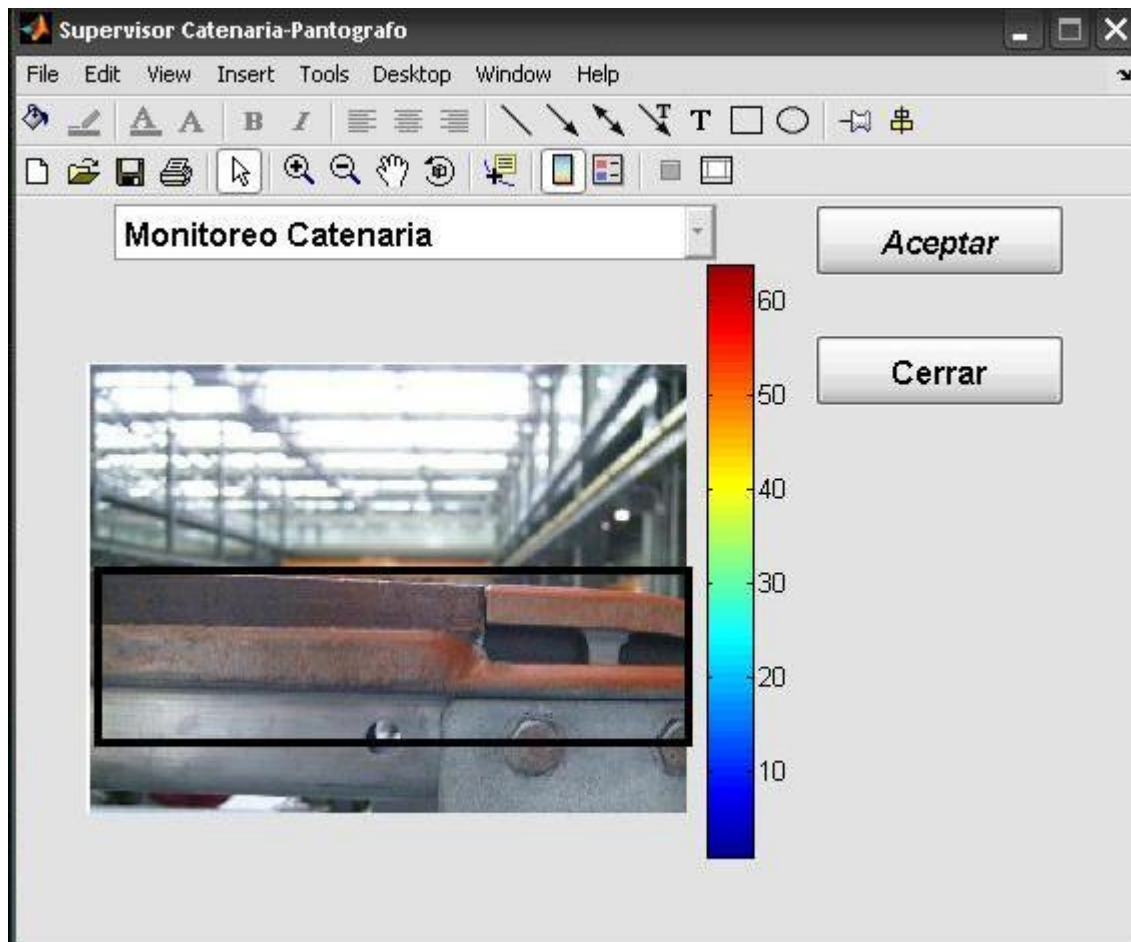


Figura 2.10. Ventana donde se observa la zona de captación de energía para elaborar el diagnóstico a partir del patrón de la figura anterior.

En la figura 2.10, a medida que se desgasta el grafito o carbón del contacto Catenaria-Pantógrafo, los píxel son reflejados en el mapa de colores (colormap) y esto es identificado como un nivel de falla o deterioro en el objeto. Luego es llevado a un arreglo de matriz, que se identifica como una barra de espectro que lo toma una red neuronal para su predicción en el rango de fallas. Pero se adaptó un Demo desde el Matlab para la obtención de los patrones con el trabajo de una red neuronal operando por una función por descomposición cuadrática de la imagen, cuya ventana se muestra en la figura 2.11.

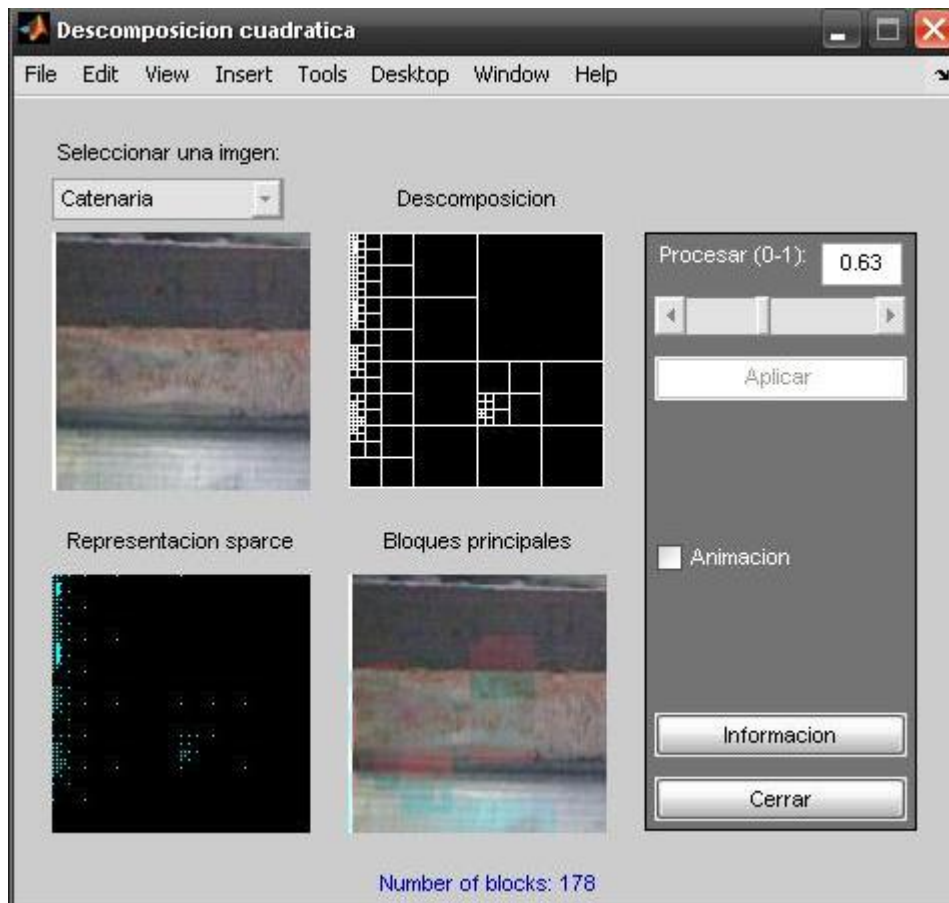


Figura 2.11 Proceso de obtención de diagnóstico por descomposición de la imagen.

2.3 Valoración Social

El aporte a la sociedad que se espera es lograr que el sistema ferroviario sea mas confiable ya que tendrá un sistema adicional que será el monitoreo de la captación de la energía eléctrica en el contacto Catenaria-Pantógrafo. Uno de los aportes es que se conocerá con certeza cuando realizar un mantenimiento, evitando los costos operativos por paradas del sistema. Y el aporte al medio ambiente es que se disminuirá el ruido al ambiente porque se mantendrá un buen contacto entre la Catenaria y el Pantógrafo, se disminuye la cantidad de residuos que se desprende de la conexión Catenaria Pantógrafo. Y al no utilizar el combustible fósil para lograr la tracción en los ferrocarriles, se contamina en menor proporción al ecosistema.

2.4 Valoración Económica

En el desarrollo de los ferrocarriles a nivel mundial las fuerzas competitivas, el afán de lucro y las presiones por la supervivencia ayudan a difundir los cambios en la economía, las esferas sociales e institucionales más amplias, donde también se necesita el cambio, sufren la inercia proveniente de la rutina, de la ideología y de intereses creados. [...] Es así que los primeros 20 o 30 años de difusión de cada revolución tecnológica llevan consigo a un aumento de la desarticulación entre la economía y los sistemas sociales y reglamentarios." (Pérez, 2002).

La propuesta de supervisión del contacto Catenaria- Pantógrafo se fundamenta en que actualmente, un ferrocarril que realice 10 viajes diarios entre Caracas y Cúa, produce una cantidad de 35610Bs, lo cual se dejará de percibir si hay que realizar una reparación al sistema, y sin ver el mercantilismo, el otro factor es la gran cantidad de personas y mercancías que no podrá llegar a su destino.

2.5 Valoración ambiental

La contaminación al ambiente que causa la utilización del sistema Catenaria, Pantógrafo es en primer lugar debido a que la energía eléctrica proviene bien sea de una planta termoeléctrica, o una planta hidroeléctrica. Cuando proviene de una planta termoeléctrica se sabe que aquí se debe quemar un combustible primario esto de una u otra forma va a generar desprendimiento a la atmósfera de dióxido de carbono, así como otros residuos que contaminarán en primer lugar la atmósfera, ríos, lagos, mares, etc. También tenemos que tomar en cuenta que para instalar una planta termoeléctrica en un lugar determinado la devastación del ambiente es prácticamente una barbarie, y una vez que entra en producción continúa su proceso de destrucción al ambiente. En el caso de provenir esta energía eléctrica de una hidroeléctrica, la devastación de la flora y la fauna cuando se construye la represa es total, exterminando especies por completo, y aquellas especies que no fueron extinguidas inicialmente, lo serán posteriormente si no se tiene el cuidado estricto ya que al operar la hidroeléctrica comenzara un proceso de decantación y sedimentación lo que trae como consecuencia poca oxigenación del agua y como contrapartida la muerte de muchas especies. Esto quiere decir que mientras mas energía utilice

el ferrocarril mucho mayor será la contaminación al ambiente, pero también tenemos que tener presente que los últimos estudios han arrojado que como el ferrocarril es para uso masivo de transporte de personal y mercancías, es mejor este servicio que utilizar vehículos particulares, porque generan mayor contaminación. con este trabajo se pretende en primer lugar ahorrar energía ya que al utilizar un contacto óptimo entre la Catenaria y el Pantógrafo contribuimos a que no se produzca el despegue del Pantógrafo, evitando que se produzcan arcos, chispas, fugas que alteran el equilibrio en el contacto aumentando o disminuyendo las fuerzas operantes en este y por lo tanto aumentando la exigencia de energía cuando se reponga el contacto, si logramos un control optimo sobre este contacto lograremos un ahorro energético y como consecuencia un menor impacto al ambiente

Conclusiones Parciales

- Se logró la modelación y simulación del contacto Catenaria-Pantógrafo, lo que permitió determinar los valores de la rigidez, y la fuerza del contacto Catenaria-Pantógrafo del sistema ferrocarrilero de los valles del Tuy “General Ezequiel Zamora”.
- Se generaron los patrones, para identificar el funcionamiento del contacto Catenaria-Pantógrafo, los cuales permitieron realizar el diagnostico del sistema.
- Se implementó un programa supervisor del contacto Catenaria-Pantógrafo, contando con la herramienta de las redes neuronales, que permite el carácter predictivo del supervisor.

CONCLUSIONES GENERALES

- Los parámetros constructivos y de funcionamiento de la catenaria del sistema ferroviario de los Valles del Tuy, se encuentran en el rango establecido por normas internacionales.
- Mediante el método propuesto, es posible supervisar el estado del captador de energía eléctrica a partir de métodos visuales que capturan y analizan las imágenes del contacto Catenaria-Pantógrafo.

RECOMENDACIONES

- Continuar con la creación de patrones para identificar anomalías, y que permiten ampliar la base de datos.
- Investigar sobre la función analítica de reconocimiento de imágenes para elevar las cualidades predictivas del supervisor.
- Explorar el diseño de sensores virtuales en aquellas variables limitadas en su medición física.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- A.Colina, F. Resta, M.Papi, D. Carrillo. 2003. "Aplication of the EKF to the estimation of contact forces in pantograph-Catenary system" WCRR'03,
- Álvarez, E. 1995. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Revista de Construcción de Maquinaria. UCLV. Año 20. N 2.
- Álvarez, E. & González J. 1993. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Revista Construcción de maquinaria. Santa Clara.
- Albiol, A; Mora, I; & Naranjo V. 2001. Real_time high density people counter using morphological tools". IEEE transactions on intelligent transportation systems.
- Alegre, E; Alaiz, R; Barreiro, J. & Ruiz, J. 2002. tool wear classification using shape signatures from digital images and neural networks
- Bruno G. 1982. ferrocarril y desarrollo endógeno.
- Benito, R. 2004. La tracción eléctrica en la velocidad ferroviaria, Madrid
- Allotta, B; Pugiy L.; & M. 2001 Rinch, alcune esperienze su un Pantógrafo dotato di sistema di regolazione della forza di contatto
- Portu. 2001. "SNCF observeur High-Speed track inspection Project".
- Carnicero A; Jiménez, J., modelación de Catenaria.
- Carnicero. A; López, O. & Torres. V. 2004. "Anales de mecánica y electricidad".
- C. Alippi, Casagrande E.; Fumagalli, M. 2002. "An embedded Systems methodology for real-time Análisis of railways track profile". IEEE Instrumentation and measurement, USA.
- Maravall, D. 1993. "Reconocimiento de formas y visión artificial". Editorial Rama.
- Malamas, E.; Petrakis, E.; Zervakis, M. 2003. "A survey on industrial vision systems, applications and tools", Image and vision computing.
- Fagnano, F. & Raschiatore, P. 2001. "use of image processing systems for automated and high speed inspection of Wheel and pantograph".

- Firpo, F; Bozzo, R & Savio, S. 2003. "Reost. proyect:safety análisis and risk assessment concerning risk relevant to hazardous obstacles on the tracks"
- Forum Maintenance catenaire. Sep. 2000, Paris.
- Garibotto, G; Corvi M. 2003. "3DMODS: 3D moving obstacle detection system" proceedings. 12th International Conference on image Analysis and processing.
- Gotzon, A. 2005.Tendencias tecnológicas del transporte, horizonte 2015
- Hoefler, H.; Seib, M. and Jetter V. 2001. "High speed overhead wire monitoring"
- Moller, H.; Hulin B. 2001. "Video based obstacle detection in catenaries of railways".
- Hoffmann, E. 2000.Tecnología Industrial y de Tracción, frotadores de Carbón.
- Marchant, J ; Onyango, C. 2003. "Model-based control of image acquisition". Image and vision computing,
- Karuslski, K.; McGarvey, J. 1997. "Automatic Camera exposure control using variable exposure index CCDsensor". US Patent US5610654.
- Frey, K. & Pocock, J. 1997. "Aplication of machines vision to maintenance inspection and resource optimization", London, Imeche.
- López, C. 2006. Modelo simplificado de la interacción dinámica Catenaria-Pantógrafo. Revista Anales de mecánica y electricidad para vehículos de accionamiento eléctrico.
- Martínez, J. 1986. Teoría y práctica del rozamiento. La Habana.
- Manuales del centro de formación tecnológica ADIF.
- Manual de instituto de ferrocarriles del estado (IFE).
- Baba, M.; Ohtani, K. 2001. "Afast edge location measurement with subpixel accuracy". IEEE Proceedings instrumentation and Measurement Technology.
- Pero, S. 2000. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades, 3ra Edición, España.
- Albarracin, P. 2005. Cálculos del ahorro de energía por menor fricción.

- Gonzalez, R.; Woods, R. 1992. "Digital Image Procesing".
- Sánchez , J. 1998. Cálculo mecánico, universidad de castilla.
- Sabino, A. Simulación del sistema Catenaria-Pantógrafo, universidad pontificias comillas.
- Borromeo, S.; Aparicio J. 2002. "automatic systems for wear measurement of contact wire in railways"
- Borromeo, S.; Aparicio J.; & Martínez P. 2003. MEDES: Contact wire wear measuring system used by the Spanish National Railway (RENFE)". Proceeding OF THE I MECH part F. Journal of rail and rapid transit.
- Borromeo, S. 2004. Tesis Doctoral.
- Fararooy, S.; Allan J.; & Edwards A. 1996 "platform-train CCTV transmission technology".
- Murakami, S.; Wada A. 2000. "an automatic extraction and display method of walking persons' trajectories" proceedings 15th International conference on pattern recognition.
- Tribología. Metatube. [Documento en línea]
<http://www.metallube.es/tribologia.asp>. [Consultado: 16 jun.2006].
- Tribología: práctica diaria en la industria: STLE. [Documento en línea]
<http://www.conservaenergia.com/>.

ANEXOS

Obtención de patrones a partir de procesamiento de imágenes

Un ejemplo práctico del procesamiento de imagen se escribe mediante el siguiente programa:

```
% --- Medición del objeto a través de la imagen, el cual obscurecido por el
% proceso del software ---
%Paso 1: Leer la imagen
%Paso 2: Enlazar la imagen
%Paso 3: Extraer las propiedades iniciales del punto de localización
%Paso 4: Trazar sus propiedades
%Paso 5: Mostrar el marco significativo del objeto
% -----

%Paso 1: Leer la imagen

RGB = imread('cuadro8.jpg');
imshow(RGB);
text(165,45,'Estima el cuadro del objeto',...
    'FontWeight','bold','Color','b');
pause

%Paso 2: Enlazar la imagen

%Convierte la imagen a fondo negro y blanco para su consecuente extracción,
y coordenadas usando el
% trazador de propiedades.
I = rgb2gray(RGB);
threshold = graythresh(I);
BW = im2bw(I,threshold);
imshow(BW)
pause

%Paso 3: Extraer las propiedades iniciales del punto de localización

dim = size(BW);
col = round(dim(2)/2+220);
```

```

row = min(find(BW(:,col)));
%Paso 4: Trazar sus propiedades

connectivity = 8;
num_points = 2855;
contour = bwtraceboundary(BW, [row, col], 'E', connectivity, num_points);
imshow(IMG);
hold on;
plot(contour(:,2),contour(:,1),'r','LineWidth',4);
% Paso 5: Mostrar el marco significativo del objeto

% Re-escribir la ecuación básica para el cuadrilátero, para esto es una
% caja
%laserFig = figure;
%hBox = plot([0 0 0.5 0.5 0], [0 0.5 0.5 0 0], 'b-');
%hold on
%hBox=plot([0 0 1 1],[1 1 1 1],'r-')
%axis=([0 10.2 10.2 1.2])
%axis('equal')
% Graficando el centro del cuadrado
%theta = 0:0.01:2*pi;
% Parametrizando la representación del cuadrado y obteniendo sus
% coordenadas
%Xfit = radius*cos(theta) + xc;
%Yfit = radius*sin(theta) + yc;
%plot(Xfit, Yfit);
%message = sprintf('El area estimada en pixel es', radius);
%text(15,15,message,'Color','y','FontWeight','bold');

```

Tratamiento de imágenes usando algoritmo Lucy-Richardson

Este algoritmo puede ser usado cuando la función reconoce un sector de los píxel de la imagen y para esto conoce y utiliza el operador PSF (point-spread function), pero una pequeña falta de información causa ruido.

Esto es superado de manera iterativa a través del algoritmo Lucy-Richardson. El sistema visual u óptico adicional puede mejorar y restaurar la calidad de la imagen.

El procedimiento incluye los siguientes pasos:

- 1: Leer la imagen
- 2: Simular el sector de interés de la imagen
- 3: Restaurar toda la imagen incluyendo posibles distorsiones
- 4: Iterar la restauración y exploración
- 5: Control de la amplificación del ruido por Damping
- 6: Crear una muestra de la imagen
- 7: Simular un sector de la imagen
- 8: Proveer el peso del arreglo
- 9: Proveer un fino muestreo PSF

Los códigos para procesar desde MATLAB son como sigue.

1: Leer la imagen

```
I = imread('board.tif');  
I = I(50+[1:256],2+[1:256],:);  
figure;imshow(I);title('Original Image');
```

2: Simular el sector de interés de la imagen

Para el tratamiento se usa un filtro de tipo Gaussiano a través de la function PSF

```
PSF = fspecial('gaussian',5,5);  
Blurred = imfilter(I,PSF,'symmetric','conv');  
figure;imshow(Blurred);title('Blurred');
```

La varianza V y distorsión de la imagen, debido a que la cámara esta en constante movimiento, el algoritmo recomienda: $V = .002$;

```
BlurredNoisy = imnoise(Blurred,'gaussian',0,V);  
figure;imshow(BlurredNoisy);title('Blurred & Noisy');
```

3: Restaurar toda la imagen incluyendo posibles distorsiones

Se recomienda usar hasta cinco iteraciones desde la función PSF (por defecto hasta 10). La salida del arreglo es del mismo tipo como la entrada.

```
luc1 = deconvlucy(BlurredNoisy,PSF,5);
figure;imshow(luc1);title('Restored Image, NUMIT = 5');
```

4: Iterar la restauración y exploración

Luego de la restauración de la imagen se investiga su evolución de la imagen.

El ruido es tratado mediante el comando:

```
luc1_cell = deconvlucy({BlurredNoisy},PSF,5);
```

En este caso la salida es convertida como una celda de arreglo.

La celda de salida consiste en un arreglo numérico. El primero es el ruido de la imagen tipo BlurredNoisy, la segunda es la imagen restaurada de clase doble arreglo. El tercer arreglo es el resultado de antes y después de la última restauración y el cuarto es un parámetro de los ajustes de las iteraciones.

Se puede usar por defecto un numero de iteraciones tales como (NUMIT = 10).

La imagen restaurada es el resultado total de 15 iteraciones

```
luc2_cell = deconvlucy(luc1_cell,PSF);
luc2 = im2uint8(luc2_cell{2});
figure;imshow(luc2);title('Restored Image, NUMIT = 15');
```

5: Control de la amplificación del ruido por Damping

Para esto se debe programar:

```
DAMPAR = im2uint8(3*sqrt(V));
luc3 = deconvlucy(BlurredNoisy,PSF,15,DAMPAR);
figure;imshow(luc3);
title('Restored Image with Damping, NUMIT = 15');
I = zeros(32);I(5,5)=1;I(10,3)=1;I(27,26)=1;I(29,25)=1;
figure;subplot(231);imshow(1-I,[]);
set(gca,'Visible','on','XTickLabel',[],'YTickLabel',[],...
'XTick',[7 24],'XGrid','on','YTick',[5 28],'YGrid','on')
title('Data');
```

6: Crear una muestra de la imagen

Se pueden seguir los códigos

```
PSF = fspecial('gaussian',15,3);  
Blurred = imfilter(I,PSF,'conv','sym');
```

7: Simular un sector de la imagen

A través de:

```
CutImage = Blurred.*WT;  
given PSF. CutEdged = edgetaper(CutImage,PSF);  
subplot(232);imshow(1-CutEdged,[],'notruesize');  
set(gca,'Visible','on','XTickLabel',[],'YTickLabel',[],...  
'XTick',[7 24],'XGrid','on','YTick',[5 28],'YGrid','on');  
title('Observed');
```

8: Proveer el peso del arreglo

Este paso debe ser atendido desde la red neuronal.

9: Proveer un fino muestreo PSF

Se debe atender la calidad de la imagen capturada y con esto:

```
Binned = squeeze(sum(reshape(Blurred,[2 16 2 16])));  
BinnedImage = squeeze(sum(Binned,2));  
Binned = squeeze(sum(reshape(PSF(1:14,1:14),[2 7 2 7])));  
BinnedPSF = squeeze(sum(Binned,2));  
subplot(234);imshow(1-BinnedImage,[],'notruesize');  
set(gca,'Visible','on','XTick',[],'YTick',[]);  
title('Binned Observed');
```

Para superar un submuestreo el algoritmo recomienda:

```
luc5 = deconvlucy(BinnedImage,BinnedPSF,100);  
subplot(235);imshow(1-luc5,[],'notruesize');  
set(gca,'Visible','on','XTick',[],'YTick',[]);  
title('Poor PSF');  
luc6 = deconvlucy(BinnedImage,PSF,100,[],[],2);  
subplot(236);imshow(1-luc6,[],'notruesize');  
set(gca,'Visible','on','XTick',[],'YTick',[]);
```

```
title('Fine PSF');
```

El programa diseñado en Matlab se muestra a continuación para la Red Neuronal

```
I = imread('cameraman.tif'); J = imadjust(I,[0 0.2],[0.5 1]); imshow(I)
```

```
figure, imshow(J)
```

```
% --- Calcula histograma de la foto ---
```

```
I = imread('rice.png');
```

```
J = imadjust(I,stretchlim(I),[0 1]);
```

```
[X,map] = imread('forest.tif')
```

```
I = ind2gray(X,map); % --- imagen entrada captada
```

```
J = imadjust(I,[],[],0.5); % --- imagen ajustada target o salida
```

```
imshow(I)
```

```
figure, imshow(J)
```

```
P = [I1 I2 I3];
```

```
T = [J1 J2 J3];
```

```
% --- Creando la red ---
```

```
net = newff([0 10],[5 1],{'tansig' 'sigmode'});
```

```
% --- Simulando la red ---
```

```
Y = sim(net,P);
```

```
plot(P,T,P,Y,'o')
```

```
% --- Entrenando la red ---
```

```
net = train(net,P,T);
```

```
% Comparando resultados
```

```
Y = sim(net,P);
```

```
plot(P,T,P,Y,'o')
```

Fotos del Pantógrafo en operación normal.

