



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

**METODOLOGÍA EN EL USO DE RUIDO EN
COMPONENTES ELECTROMECAÑICOS DE UN EQUIPO
INDUSTRIAL EN OPERACIÓN PARA MANTENIMIENTO
PREVENTIVO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

PRESENTA:

MTRO. SERGIO BLAS RAMÍREZ REYNA

DIRECTOR DE TESIS: DR. MANUEL GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

CODIRECTOR DE TESIS: DR. MAXIMINO PEÑA GUERRERO

MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO

NOVIEMBRE 2025.

Autorización de impresión



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Número de control: ICBI-AAIyA/2771/2025
Asunto: Autorización de impresión

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE.

El Comité Tutorial de Tesis del programa educativo de posgrado titulado "Metodología en el uso de ruido en componentes electromecánicos de un equipo industrial en operación para mantenimiento preventivo", realizado por el sustentante Sergio Blás Ramírez Reyna con número de cuenta 076277 perteneciente al programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Industrial; una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"
Pachuca, Hidalgo a 07 de noviembre de 2025

El Comité Tutorial

Dr. Manuel González Hernández
Director

Dr. Maximino Peña Guerrero
Codirector

Dr. Juan Carlos Seck Tuoh Mora
Miembro del Comité

Dr. Norberto Hernández Romero
Miembro del comité



"Amor, Orden y Progreso"

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 DD Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergarar@uaeh.edu.mx



2025



uaeh.edu.mx

Dedicatorias:

A Dios por permitirme llegar hasta aquí.

A Vanesa y María Mireya:

Por ser la luz de mi camino, mi felicidad, mi todo y lo que me inspira a seguirme superando las amo.

A mi Papá:

Por ser mi ejemplo y te extraño mucho.

A mi Mamá:

Por ser ejemplo de fortaleza y por seguir apoyándome y guiándome en todo momento

A mis hermanos Sandra, José Manuel, Enrique y Guillermo:

Por estar siempre conmigo.

A mis suegros Jacinto y Mireya:

Por el apoyo incalculable que me han dado.

A mis Cuñadas y Cuñados:

Por siempre estar ahí cuando los necesito.

A mis sobrinos Manuelito, Alexis, Sebastián, Mayte, Brenda, Mónica y Liam:

Por alegrarme la vida.

Agradecimientos:

A mis directores de Tesis Dr. Manuel González Hernández y Dr. Maximino Peña Guerrero:

Por qué sin su apoyo, su tiempo y disposición no lo hubiera conseguido son ustedes un gran ejemplo como personas y como profesionales.

A mis asesores Dr. Juan Carlos Seck Tuoh Mora y Dr. Norberto Hernandez Romero:

Gracias por su apoyo y disposición para la realización de este trabajo.

Al Dr. José Ramón Corona Armenta y Dr. Oscar Montaña Arango

Por qué gracias al apoyo y consejos que me han dado, pero más aun por su amistad.

Al Maestro Joel Montesinos Hernández:

Por ser un guía en toda mi formación y un amigo que siempre ha estado conmigo

A todo el AAIyA:

Por el apoyo incondicional que siempre me han dado...

A mi Universidad Autónoma Del Estado de Hidalgo y al Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería por dejarme ser parte de esta gran institución.

Resumen

Se presenta la metodología de una técnica alternativa de mantenimiento preventivo basada en las emisiones acústicas de los componentes de un sistema electromecánico industrial. Este enfoque permite identificar fallas en los componentes mediante el análisis del ruido producido durante la operación del equipo. La mayoría de los componentes electromecánicos presentan la característica de emitir sonidos que pueden ser registrados e interpretados como indicadores de posibles fallos.

El mantenimiento preventivo, entendido como la inspección sistemática y la corrección de fallas antes de que ocurran o evolucionen hacia defectos graves, requiere la realización de pruebas, mediciones, ajustes y sustitución de piezas. Estas acciones son esenciales para detectar interrupciones que afectan directamente tanto los costos de producción como la calidad de los productos fabricados.

En este contexto, las fallas pueden diagnosticarse a través del ruido generado por los componentes del equipo en funcionamiento. La señal capturada mediante un micrófono se compara con patrones de referencia almacenados en una base de datos bajo condiciones normales de operación. Dichas señales se representan matemáticamente a través de coeficientes, que constituyen la base para la comparación.

Esta tesis desarrolla un Sistema de Mantenimiento integrado en una plataforma SCADA, diseñado para analizar la señal acústica emitida por los componentes industriales. El sistema evalúa si los coeficientes de la señal capturada coinciden con los coeficientes de la base de datos dentro de una tolerancia definida. Una ventaja clave de este enfoque, en comparación con métodos convencionales como los acelerómetros, es su capacidad para obtener información de componentes ubicados en zonas inaccesibles o áreas de trabajo peligrosas.

Palabras Clave: Mantenimiento preventivo, ruido, Componentes electromecánicos industriales, Fallas, Sistema SCADA

Abstract

The methodology of an alternative preventive maintenance technique based on the acoustic emissions of industrial electromechanical components is presented. This approach enables the identification of component failures by analyzing the noise produced during equipment operation. Most electromechanical components exhibit the characteristic of emitting sounds that can be recorded and interpreted as indicators of potential faults.

Preventive maintenance, understood as the systematic inspection and correction of failures before they occur or evolve into severe defects, requires testing, measurements, adjustments, and part replacement. These actions are essential to detect interruptions that directly affect both production costs and product quality.

In this context, failures can be diagnosed through the noise generated by equipment components in operation. The captured signal, obtained via a microphone, is compared against reference signals stored in a database under normal operating conditions. These signals are mathematically represented through coefficients, which serve as the basis for comparison.

This thesis develops a Maintenance System integrated into a SCADA platform, designed to analyze the acoustic signal emitted by industrial components. The system evaluates whether the coefficients of the captured signal match those in the database within a defined tolerance. A key advantage of this approach, compared to conventional methods such as accelerometers, is its ability to acquire information from components located in inaccessible or hazardous areas.

Key Words: Preventive maintenance, Noise, Industrial electromechanical components, Failures, SCADA system

Índice

Autorización de impresión.....	2
.....	¡Error! Marcador no definido.
Dedicatorias:	3
Agradecimientos:	3
Resumen	4
Abstract.....	5
Índice.....	6
Índice de figuras.....	8
Índice de tablas.....	9
Introducción	10
Capítulo 1.....	14
Propósito y Organización.....	14
1.1 Planteamiento del problema	14
1.2 Hipótesis.....	15
1.3 Propósito de la investigación	15
1.4 Objetivo general.....	16
1.5 Objetivos específicos	16
1.6 Justificación de la investigación	16
Capítulo 2.....	18
Mantenimiento de los Sistemas	18
2.1 Antecedentes.....	18
2.2 Mantenimiento Industrial	19
2.3 Políticas de Mantenimiento.....	23
2.4 Plan de Mantenimiento	24
Capítulo 3.....	27
Modelo del Sistema	27
3.1 Metodología del Trabajo	28
3.2 Extracción de los Parámetros	30
Capítulo 4.....	35
Algunos Conceptos del Procesamiento Digital de Señales.....	35
4.1. Filtros Latice FIR Todo-Polos	35
4.2 Filtro Pasa Bajo con Series de Fourier	38

4.3 Filtro Pasa Bajo Básico.....	44
4.4 Filtro Digital Real Pasa Bajo	48
4.2 Coeficientes de Predicción Lineal.....	52
4.6 Tabla de transición de estados	56
Capítulo 5.....	60
Pruebas y Resultados.....	60
5.1. Comparación de resultados.....	63
5.1.1. Sistema SCADA	64
5.1.2. Objetivos de los Sistemas SCADA.....	64
5.1.3. Asistencias	65
5.1.4. Ventajas.....	66
5.1.5. El entorno	67
5.1.6. Criterios de selección y diseño	68
5.1.7. Arquitectura de un sistema SCADA	69
Conclusiones y Trabajos Futuros.....	72
Apéndice	74
Bibliografía	84

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama general del contenido. Elaboración propia.....	13
Figura 2: Diagrama del sistema computacional detector de fallas. Elaboración propia.....	20
Figura 3: Modelo eléctrico equivalente. Elaboración propia.....	31
Figura 4: Modelo con tubos. Elaboración propia.....	31
Figura 5: Modelo en forma directa del filtro todo polos. Elaboración propia.....	32
Figura 6. Modelo con filtro latice todo polos. Elaboración propia	32
Figura 7: Modelado tubos en tiempo real con rt_lpc .exe. Elaboración propia	33
Figura 8: Señal original, error, y la señal reconstruida. Elaboración propia	33
Figura 9: Red de 2 puertos para kth etapas de un filtro Latice todo polo. Elaboración propia	36
Figura 10: Etapas de p Matices. Elaboración propia	36
Figura 11. Latice FIR de segundo orden. Elaboración propia	38
Figura 12: Filtro Analógico Base. Elaboración propia.....	44
Figura 13: Gráfica para 1a expresión 4.14 con $R=8\Omega$ $L=0.000318$ Hy y $f_c = 400$ Hz. Elaboración propia	46
Figura 14: Graficas para la expresión 4.17. Elaboración propia	47
Figura 15: Gráficas para la Expresión 4.24. Elaboración propia	51
Figura 16: Autómata. Elaboración propia	59
Figura 19: Funcionamiento normal del equipo. Elaboración propia	60
Figura 20: Funcionamiento de un componente a punto de dañarse. Elaboración propia	60
Figura 21: Componente dañado. Elaboración propia	61
Figura 17: Esquema básico de un sistema de adquisición y control de señales de ruido. Elaboración propia.....	62
Figura 18: Obtención de los coeficientes LPC de un ruido como el de la voz. Elaboración propia	71

Índice de tablas

Tabla 1: Tabla de transición de estado	57
Tabla 2: Coeficientes de reflexión para un ruido.....	62
Tabla 3: Coeficientes LPC para un ruido	62

Introducción

El propósito de esta tesis es mostrar una técnica como alternativa para el mantenimiento preventivo, utilizando el ruido de los componentes electromecánicos. En la mayoría de ellos se puede detectar y registrar el ruido como un indicio de que se tiene una posible falla. La técnica que el personal de una empresa utiliza con el propósito de mantener un equipo en condiciones y facilidades de operación dado que, por inspección sistemática, y corrección de fallas en desarrollo antes de que ellas ocurran o antes de que se desarrollen en defectos mayores se conoce como mantenimiento preventivo.

Este proceso de mantenimiento debe incluir pruebas, medidas, ajustes y reemplazo de partes, hacer específicamente la detección de fallas donde ocurran, estas reflejan el costo y calidad de los artículos fabricados. Por lo tanto, las fallas se pueden elucidar por medio del ruido que los componentes del equipo en operación generan como indicio de la posible falla. La técnica que se propone consiste en capturar ese ruido como señal a través de un micrófono, para lo cual se ha construido un sistema computacional que registra la señal del componente del equipo en operación y se compara con patrones de señales previamente registradas en una base de datos de los componentes del mismo equipo.

En la literatura como se verá, no se encontró una propuesta como la que aquí se presenta, la cual ofrece algunas ventajas con respecto a otras como es el caso de los acelerómetros que más adelante se explicará. Se debe mencionar que los patrones de las señales almacenados en la base de datos fueron capturadas y analizadas quedando establecidas como señales por medio de los coeficientes de su representación matemática. Para el análisis se elaboró un sistema computacional que monitorea, la señal de ruido a través de un micrófono unidireccional; por medio de él, se captura la señal de ruido y se procesa de tal forma que los coeficientes de la señal capturada se compara con un margen de error y se decide a indicar sí o no se tiene una falla en el componente, en este proceso como es usual para el tratamiento de la señal, se envía a un convertidor analógico digital para su análisis usando alguna de estas técnicas, por ejemplo Análisis de Fourier (Champeney, 1987), (Welch, 1967), o bien Transformada Discreta de Fourier (DFT) (Smith III, Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT) with Audio Applications, 2007), (Burrus & Parks, 1985) o el Código de

Predicción Lineal (LPC) (Makhoul, 1975) (Markel & Gray, 1976) que fue el que se utilizó. Entonces, como resumen se dice que una falla existe, si la señal capturada por el micrófono de la componente del equipo no corresponde bajo una tolerancia con la señal registrada previamente en la base de datos.

Métodos comunes para determinar donde la organización de las políticas de mantenimiento preventivo de manejo de fallas debe ser aplicadas son: las recomendaciones, requerimientos de códigos y legislación dentro de la jurisdicción, que un experto piensa como debe ser hecho, o el mantenimiento que se ha hecho en equipo similar (Campbell Jr., Tremain, & Welch, 1990). Sin embargo, el Centro de Confiabilidad y Mantenimiento, suministra el más riguroso método para determinar políticas de mantenimiento aplicables y efectivas que pueden incluir tareas de mantenimiento preventivo para un elemento. Mantenimiento preventivo es considerado para mantener un equipo trabajando y/o extender la vida media del equipo lo cual es realmente el propósito.

Claramente se menciona que cuando la falla ocurre el mantenimiento es correctivo, algunas veces llamado “reparación” para que el equipo siga trabajando, el tiempo de reparación algunas veces es muy grande. La meta principal de mantenimiento es evitar o mitigar las consecuencias de la falla de equipo. Esto puede prevenir la falla antes de que ella ocurra. Las actividades del mantenimiento preventivo incluyen la revisión parcial o completa en periodos programados. Además, los obreros pueden registrar los deterioros del equipo, así como conocer el reemplazo o reparación de las partes dañadas antes de que ellas causen una falla mayor. El programa de mantenimiento preventivo ideal prevendría todas las fallas del equipo antes de que ocurran, pero eso no es posible.

Desde el punto del estado del arte, no encontré políticas de la supervisión o sistemas automáticos para prevenir la falla en un equipo basado en ruido de las componentes cuando está en operación o al menos monitorear la falla por el ruido del componente. Por lo cual considero que esta es la contribución de la tesis, es decir contar con una técnica de mantenimiento preventivo usando el ruido. Algunas compañías ofrecen herramientas, consejos y aplicaciones de mantenimiento preventivo basados en monitoreo usando acelerómetros, sensores de vibración y redes de accesorios para situaciones industriales. Sus sensores son esenciales para programas de monitores de vibración, ahorran y reducen paros técnicos y mejoran la seguridad en las fábricas en todo el mundo. Existen sistemas tipo

SCADA que requieren de sistemas de sensores realmente complejos y costosos, pero más aún la instrumentación está colocada directamente sobre el equipo que se va a monitorear, lo cual no ocurre con mi sistema. Sin embargo, en algunos equipos no es posible utilizar por ejemplo acelerómetros para medir la frecuencia de vibración del componente, porque es inaccesible el espacio para medir o bien es peligroso, digamos en una planta nuclear. La diferencia de usar un acelerómetro para detectar la falla o usar un micrófono para escuchar el ruido de la falla es que el acelerómetro requiere estar en contacto con la componente y el micrófono no. Se considera que las fallas inician cuando algún ruido no es usual de la componente del equipo, aun cuando dicho ruido no lo escuchemos. Esto nos puede indicar que probablemente ocurrirá una falla en el equipo.

Se debe mencionar que, la detección de las fallas es un subcampo de ingeniería del control que trata con la identificación de la falla bajo alguna tolerancia y el tipo de la falla y su localización. Dos planteamientos se pueden distinguir reconocimiento directo de patrones y lectura de sensores que indican una falla y un análisis de discrepancia entre la lectura del sensor de los valores esperados, derivados del modelo. En el último caso, típicamente la falla se ha detectado si la discrepancia o el residuo están debajo de cierto nivel. Es entonces la tarea de aislar la falla para recategorizar su tipo de localización en la maquinaria.

El documento está constituido con resumen, índice, introducción y seis capítulos: propósito y Organización, Mantenimiento de los sistemas, Modelo del sistema, Algunos conceptos del procesamiento digital de señales, Pruebas y Resultados, así como Conclusiones y Trabajos futuros. Además, se incluye el código fuente del sistema PMS como un apéndice. Al inicio de este trabajo se muestra en la figura 1 el contenido general de los temas y herramientas involucradas en esta investigación.

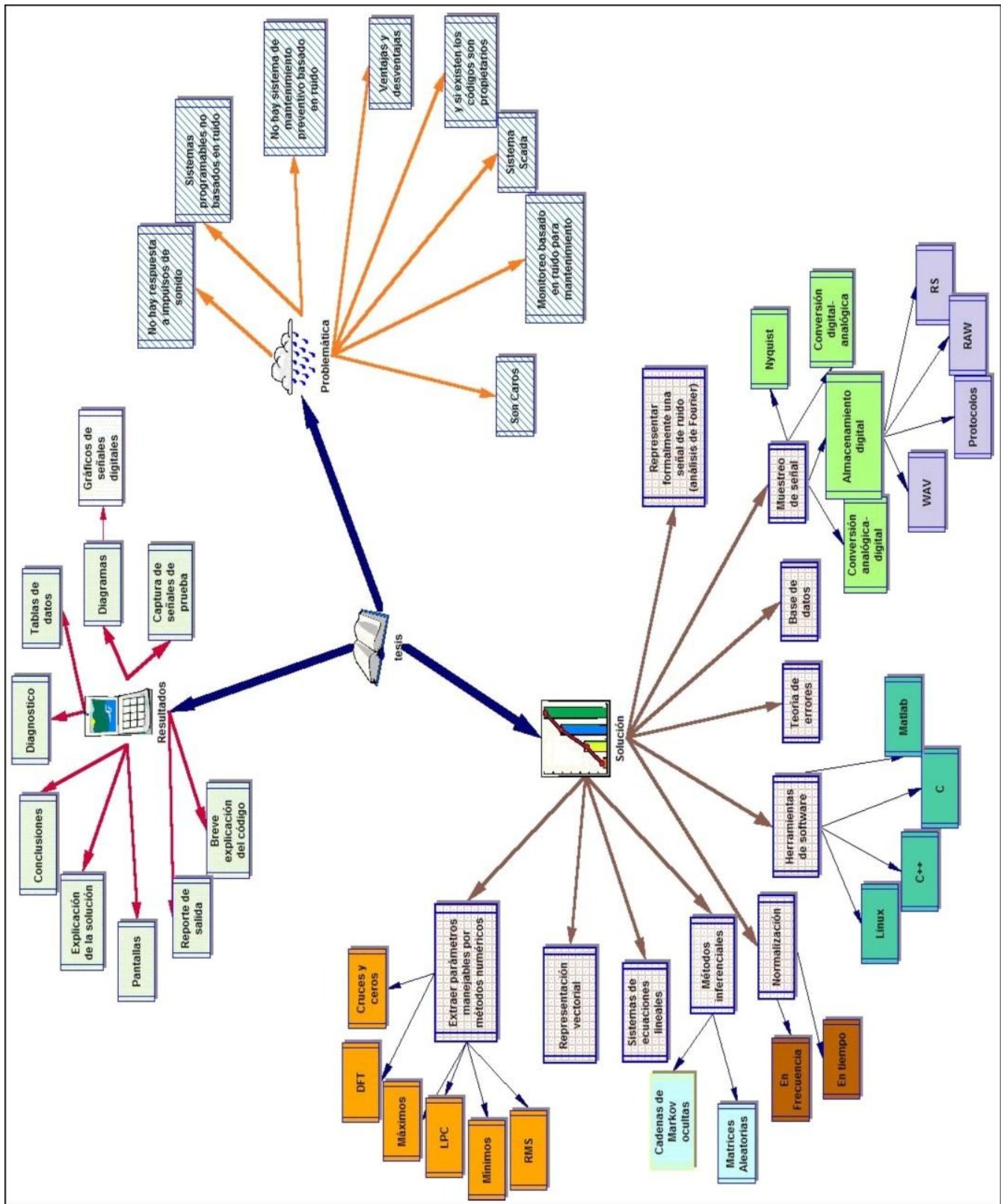


Figura 1
 Figura 1: Diagrama general del contenido. Elaboración propia

Capítulo 1

Propósito y Organización

1.1 Planteamiento del problema

La técnica que el personal de una empresa utiliza con el propósito de mantener un equipo en condiciones y facilidades de operación dado que, por inspección sistemática, y corrección de fallas en desarrollo antes de que ellas ocurran o antes de que se desarrollen en defectos mayores se conoce como mantenimiento preventivo. Este proceso de mantenimiento debe incluir pruebas, medidas, ajustes y reemplazo de partes, hacer específicamente la detención de fallas donde ocurran, estas están reflejando el costo y calidad de los artículos fabricados. El planteamiento del problema es encontrar una alternativa de mantenimiento preventivo, que, a la fecha, de acuerdo con la literatura consultada del estado del arte, no se encontró documento alguno, que, para efectuar el mantenimiento preventivo de un equipo electromecánico, se utilice como base fundamental los sonidos o ruidos que algunos componentes de dicho equipo generan cuando inicia o se tiene una falla en dichos componentes. Entonces, el problema específicamente es detectar una falla del equipo utilizando los ruidos que se producen cuando se presenta un mal funcionamiento y esto induce a efectuar el mantenimiento preventivo.

1.2 Hipótesis

Utilizando un software de procesamiento digital de señales acústicas, es posible predecir el estado de una falla mecánica de acuerdo con el sonido característico que se produce cuando un equipo electromecánico funciona normal, anormal (se escucha un ruido extraño), o de plano cuando el equipo ha dejado de trabajar. Este ruido puede ser escuchado por un experto humano, y deducir así, el posible estado de su funcionamiento, sin embargo, un sistema computacional tradicional no tiene la capacidad para elucidar la falla.

1.3 Propósito de la investigación

Se pretende utilizar la tecnología actual de procesamiento de señales digitales para implementar algoritmos computacionales en tiempo real. Ellos son trasladados a hardware vía VHDL con el fin de que el sistema tenga el menor tiempo de respuesta a cualquier impulso. Se piensa que con lo anterior es posible automatizar en su mayor parte el proceso de mantenimiento de sistemas electromecánicos. Se debe enfatizar que en la actualidad el uso de señales para mantenimiento preventivo se hace a través de acelerómetros, los cuales deben ser colocados sobre los componentes del equipo que se va a analizar de posibles fallas a través de frecuencias de vibración.

1.4 Objetivo general

Se presenta en este documento una técnica como alternativa para mantenimiento preventivo basada en ruido de los componentes de un equipo en operación. Se conoce que la experiencia de los operadores y gente experta en mantenimiento preventivo, en algunas ocasiones, infieren que está por presentarse una falla por el sonido que se escucha de los componentes del equipo. Esta gente también deduce que dicho ruido les conduzca a detectar una falla en específico. La técnica propuesta se basa en la señal de ruido que los componentes del equipo hacen cuando se encuentran en operación. Y dicha señal se compara con aquellas capturadas en una base de datos de los mismos componentes cuando el equipo trabaja correctamente. Este proceso es en tiempo real y tan pronto como se presenta un ruido extraño del equipo en cuestión, el sistema computacional detector de fallas, indica lo que está ocurriendo con la componente y señala el lugar de la posible falla.

1.5 Objetivos específicos

En este trabajo se escribirá un prototipo de software de un sistema de mantenimiento preventivo teniendo como base a un sistema SCADA, el cual permitirá dar mantenimiento preventivo a un sistema electromecánico con base en el ruido que se produce en los componentes de dicho equipo cuando funciona correctamente o cuando tiende a generar una falla.

1.6 Justificación de la investigación

A pesar de que mantenimiento preventivo generalmente se considera de gran valor, hay riesgos tales como fallas de equipo o error humano involucrado cuando se efectúa mantenimiento preventivo, justamente como cualquier operación de mantenimiento. La meta principal de mantenimiento es evitar o mitigar las consecuencias de la falla del equipo.

Es esencial mencionar al menos tres de los más importantes requerimientos en mantenimiento preventivo que son: seguridad del personal, calidad del producto, y extensión de la vida media del equipo.

El programa de mantenimiento preventivo ideal prevendrá todas las fallas del equipo antes de que ocurran. Sin embargo, no hay políticas de la supervisión o sistemas automáticos para prevenir la falla en un equipo basado en ruido de las componentes cuando se encuentra en operación, o al menos monitorear la falla por el ruido del componente. Por lo tanto, es verdaderamente justificable la investigación para crear una herramienta que pueda inferir mediante el ruido una posible falla del equipo.

Algunas compañías ofrecen herramientas, consejos y aplicaciones de mantenimiento preventivo basados en monitoreo usando acelerómetros, sensores de vibración y redes de accesorios para situaciones industriales. Sus sensores son esenciales para programas de monitoreo de vibración, ahorran y reducen paros técnicos y mejoran la seguridad en las plantas en todo el mundo. Usualmente las máquinas de las plantas sufren el desalineado de los ejes, balanceo de los rotores, fallas en los rodamientos o engranes. Datos de monitoreo de vibración nos permiten monitorear máquinas y detectar fallas.

Pero la diferencia entre usar un acelerómetro para detectar la falla o usar un micrófono para escuchar el ruido de la falla es que el acelerómetro necesita estar en contacto con la componente y el micrófono no. Se pretende que este software ofrezca un informe textual o gráfico con el propósito de dar mantenimiento preventivo, o bien el mantenimiento correctivo a un sistema electromecánico.

Capítulo 2

Mantenimiento de los Sistemas

Muchos bienes y servicios que hoy en día utilizamos son sistemas que utilizan máquinas de gran tamaño. Para su mantenimiento se requiere de personal altamente calificado de acuerdo con el costo de las instalaciones y equipos que se utilizan. Durante su operación productiva, estos sistemas son susceptibles a fallos de operación, los cuales entorpecen o, incluso, interrumpen temporal o definitivamente su funcionamiento. Generalmente estos sistemas tienen una gran cantidad de piezas móviles, que se desgastan alterando las especificaciones originales de estas máquinas. Para lograr una buena eficiencia y reducir al máximo la incidencia de fallas en estos dispositivos es necesario proporcionar un buen mantenimiento preventivo y prevenir el mantenimiento correctivo.

2.1 Antecedentes

La palabra mantenimiento se emplea para designar las técnicas utilizadas para asegurar el correcto y continuo uso de equipos, maquinaria, instalaciones y servicios, los hombres primitivos, daban mantenimiento a sus utensilios tales como afilar herramientas y armas, coser y remendar las pieles de las tiendas y vestidos, cuidar la estanqueidad de sus piraguas, etc. Durante la revolución industrial el mantenimiento era correctivo (de urgencia), los accidentes y pérdidas que ocasionaron las primeras calderas y la apremiante intervención de las aseguradoras exigiendo mayores y mejores cuidados, proporcionaron la aparición de talleres mecánicos.

A partir de 1925, se hace patente en la industria americana la necesidad de organizar el mantenimiento con una base científica. Se empieza a pensar en la conveniencia de reparar antes de que se produzca el desgaste o la rotura, para evitar interrupciones en el proceso productivo, con lo que surge el concepto del *mantenimiento preventivo*.

A partir de los años sesenta, con el desarrollo de la industria electrónica, espacial y aeronáutica, aparece en el mundo anglosajón el *mantenimiento predictivo*, por el cual

la intervención no depende ya del tiempo de funcionamiento sino del estado o condición efectiva del equipo o sus elementos y de la fiabilidad determinada del sistema. Actualmente el mantenimiento afronta una tercera generación, pues se cuenta con equipos electrónicos de inspección y de control, sumamente fiables. Es decir, es posible conocer el estado real de los equipos mediante mediciones periódicas o continuas de muchos parámetros críticos (vibraciones, ruidos, temperaturas, entre muchos otros).

Utilizando sistemas computacionales es posible realizar análisis más complejos como es el análisis fisicoquímico, tecnografía, ultrasonidos, endoscopia. Por otra parte, los sistemas de información de bases de datos y los sistemas expertos, así como técnicas de inteligencia artificial, permiten la acumulación de experiencia empírica y el desarrollo de los sistemas de procesamiento de datos en red (Painter & Spanias, 2000).

2.2 Mantenimiento Industrial

En este trabajo definimos el mantenimiento como el control y supervisión constante de las instalaciones de un sistema de máquinas. En la figura 2 se muestra el procedimiento principal del sistema computacional utilizado en dicho trabajo para la captura y análisis de la señal de ruido, con la finalidad de detectar una posible falla de componentes de un equipo industrial en operación.

El proceso contiene un conjunto de trabajos de reparación y revisión necesarios que garanticen su buen estado de conservación. De esta manera, podemos decir que

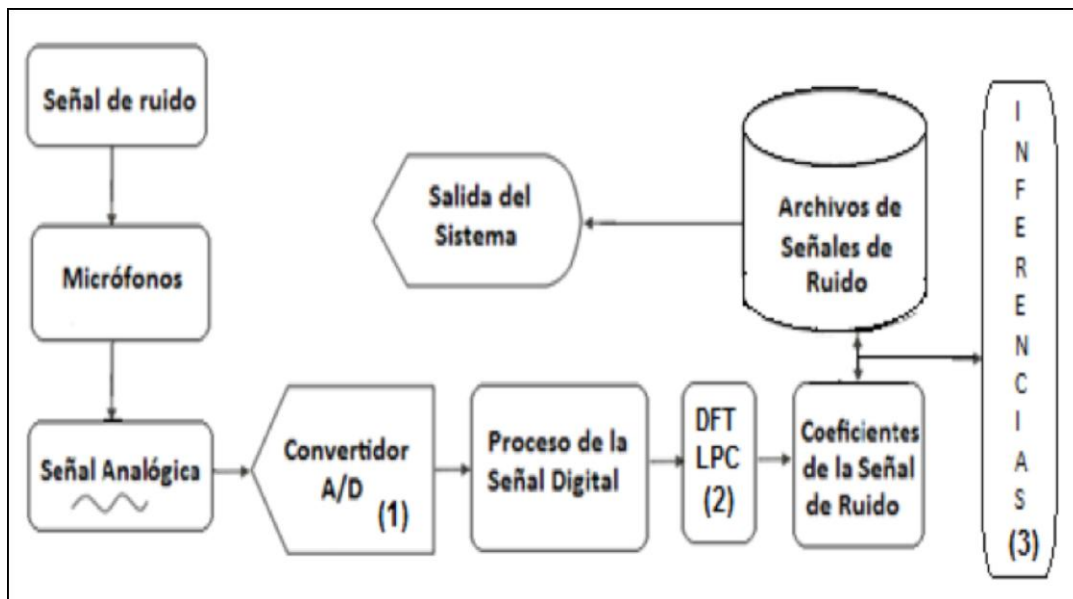


Figura 2: Diagrama del sistema computacional detector de fallas. Elaboración propia

el objetivo principal de un mantenimiento industrial se puede resumir en lo siguiente: Evitar, reducir, y reparar, las fallas sobre los bienes; disminuir la gravedad de las fallas que no se lleguen a evitar; evitar paros de máquinas; evitar accidentes; aumentar la seguridad para las personas; conservar los bienes en condiciones seguras; reducir costes y, por último, alcanzar o prolongar la vida útil de los bienes (Moradi, 2011).

Estudiaremos y analizaremos varios tipos de mantenimiento, algunos de ellos no solamente centran su atención en la tarea de corregir las fallas, sino que también tratan de actuar antes de que aparezcan dichas fallas: mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo, mantenimiento predictivo, y mantenimiento productivo total.

2.2.1 Mantenimiento Correctivo

Es el conjunto de actividades de reparación y sustitución de elementos deteriorados por repuestos que se realizan cuando aparece la falla. Este sistema resulta aplicable en sistemas complejos, normalmente componentes electrónicos o en los que es imposible predecir los fallos y en los procesos que

admiten ser interrumpidos en cualquier momento y durante cualquier tiempo, sin afectar la seguridad, también para equipos que ya cuentan con cierta antigüedad (Lie, 1986).

Tiene como inconvenientes, que el fallo puede sobrevenir en cualquier momento, muchas veces, el menos oportuno, debido justamente a que en esos momentos se somete al bien a una mayor exigencia. Asimismo, las fallas no detectadas a tiempo, ocurridas en partes cuyo cambio hubiera resultado de escaso costo, pueden causar daños importantes en otros elementos o piezas y además se debe disponer de un capital importante invertido en piezas de repuesto.

2.2.2 Mantenimiento Preventivo

Es el conjunto de actividades programadas de antemano, tales como inspecciones regulares, pruebas, reparaciones, etc., encaminadas a reducir la frecuencia y el impacto de los fallos de un sistema, algunas de las desventajas que se presentan en este tipo de mantenimiento, son los cambios innecesarios al alcanzarse la vida útil de un elemento se procede a su cambio, encontrándose muchas veces que el elemento que se cambia permitiría ser utilizado durante un tiempo más prolongado, los costos en los inventarios sigue siendo alto aunque previsible, lo cual permite una mejor gestión.

La mano de obra que se necesita para este tipo de mantenimiento es más especializada y debe ser periódica. Si por alguna razón no se realiza este servicio, entonces se alterarán los períodos de intervención, por lo tanto, se produce una degeneración del sistema. Es importante la planificación de estas tareas para este punto, esto es, se debe hacer lo siguiente: Definir qué partes o elementos serán objeto de este mantenimiento; establecer la vida útil de los mismos; y, determinar los trabajos a realizar en cada caso.

2.2.3 Mantenimiento Predictivo

Este tipo de mantenimiento consta de un conjunto de actividades de seguimiento y diagnóstico continuo de un sistema, que permiten una intervención correctora inmediata como consecuencia de la detección de algún síntoma de fallo. El mantenimiento predictivo se basa en el hecho de que la mayoría de los fallos se producen lenta y previamente, en algunos casos, arrojan indicios evidentes de un futuro fallo, o bien a simple vista, es decir, mediante la elección, medición de algunos parámetros relevantes que representen el buen funcionamiento del equipo analizado. Por ejemplo, estos parámetros pueden ser: la temperatura, la presión, la velocidad lineal, la velocidad angular, la resistencia eléctrica, los ruidos y vibraciones, la rigidez dieléctrica, la viscosidad, el contenido de humedad, de impurezas y de cenizas en aceites aislantes, el espesor de capas, el nivel de un fluido, etc. Este sistema tiene la ventaja de que el seguimiento nos permite contar con un registro de la historia de la característica en análisis, sumamente útil ante fallos repetitivos; puede programarse la reparación en algunos casos, junto con la parada programada del equipo y existen menos intervenciones de la mano de obra en mantenimiento.

2.2.4 Mantenimiento Total Productivo

Este sistema está basado en la concepción japonesa del *mantenimiento al primer nivel*, en la que el propio usuario realiza pequeñas tareas de mantenimiento como: medición, inspección, sustitución de pequeñas cosas, etc., facilitando al jefe de mantenimiento la información necesaria para que luego las otras tareas se puedan hacer mejor y con mayor conocimiento de causa. Este sistema coloca a todos los integrantes de la organización en la tarea de ejecutar un programa de mantenimiento preventivo, con el objetivo de maximizar la efectividad de los bienes. Centra el programa en el factor humano de toda la compañía.

2.3 Políticas de Mantenimiento

Para cada equipo de una planta pueden formularse varias políticas de mantenimiento, individualmente o en combinación. Las acciones que pueden llevarse a cabo antes de producirse el fallo serán preventivas. Las que se lleven a cabo después, correctivas. Debido a que, por definición, las acciones de mantenimiento preventivo son determinísticas, pueden ser programadas y realizadas generalmente por separado, según un programa de mantenimiento preventivo. El mantenimiento correctivo debido a la naturaleza probabilística del fallo y la incertidumbre no puede ser programado. Para poder planificar el mantenimiento es necesario conocer las diferentes políticas de trabajo que se pueden seguir para realizar dicho mantenimiento las que se mencionan a continuación:

La política de *reparación o sustitución a intervalo fijo antes del fallo*, será efectiva sólo cuando el modelo de fallo del elemento dependa claramente del tiempo, esperándose que el elemento se agote en el intervalo de vida de la unidad y cuando los costos totales de su sustitución sean mucho menores que los de fallo y reparación. Esta política no es apropiada para equipos de difícil sustitución (T. Nakagawa, 1979).

Por otro lado, el momento oportuno para llevar a cabo el mantenimiento correctivo se debe determinar monitorizando alguna condición, aunque no siempre es fácil encontrar un parámetro fácilmente monitorizarle que muestre el deterioro del equipo (Jelinek, 1997). En el caso de que sí se pueda, se reduce, o incluso se elimina, el factor probabilístico en la predicción del fallo, maximizándose la vida del elemento y minimizándose las consecuencias del fallo. Sin embargo, el mantenimiento basado en el estado o condición puede ser costoso en tiempo y en instrumentación. La conveniencia de esta política y su periodicidad dependerá de las características de deterioro del equipo estudiado y de los costos que éste implica. En el extremo contrario, los equipos de difícil sustitución, por ejemplo, un motor, pueden requerir un desmontaje completo para su inspección visual, pero con este tipo de equipos se pueden utilizar técnicas de monitorización de vibraciones, pulsos de choque, análisis de aceite,

termografías (Michel, 2009).

El término *mantenimiento de oportunidad* se aplica a acciones de mantenimiento realizadas después del fallo o durante reparaciones realizadas a intervalo fijo o según el estado, pero en otros elementos de aquéllos que eran la causa principal de su reparación. Esta política es la más apropiada para los elementos de difícil sustitución o en funcionamiento continuo, con altos costos de paro y/o de indisponibilidad. El mantenimiento correctivo no sólo aparece cuando un elemento falla, sino también cuando es indicado por criterio basado en la condición. La tarea básica es establecer la forma más económica de restaurar la unidad a un estado aceptable, muchos son los factores que influyen en la elección reparación-sustitución. Los más importantes son el costo de indisponibilidad, el tiempo de reparación comparado con el de sustitución, la disponibilidad y el costo de los recursos. Todos estos factores están en continuo cambio, y esto, junto con las múltiples causas posibles de defecto y las múltiples posibilidades de reparación, hacen que el plan de mantenimiento correctivo sólo pueda proporcionar una guía para ayudar a la toma de decisión.

En contraste con las políticas anteriores, cuyo objetivo es minimizar los defectos del fallo, el mantenimiento *modificativo* intenta eliminar la causa del fallo. Claramente, esto implica una acción de ingeniería en vez de mantenimiento. pero habitualmente es responsabilidad del departamento de mantenimiento. Es una política habitual en áreas de alto costo de mantenimiento que existen debido a su mal diseño o porque el equipamiento está siendo utilizado fuera de sus especificaciones de diseño.

2.4 Plan de Mantenimiento

El plan de mantenimiento de una planta deberá elaborarse a partir de la selección de la mejor combinación de las políticas enumeradas para cada elemento, coordinándolas para conseguir el uso óptimo de los recursos y el tiempo. Idealmente, las acciones preventivas y correctivas para cada unidad de la planta deberían estar especificadas con cierto detalle por los fabricantes. Esto raramente se da en los equipos de difícil sustitución en los que el mantenimiento es caro y probabilista (Narasimhan, 2008). La gran cantidad de factores que influyen en la

selección de la política de mantenimiento, hacen que sea necesario un procedimiento sistemático para determinar el mejor programa de mantenimiento para cada periodo de tiempo. Las etapas de este procedimiento se explican a continuación.

Una de las etapas más importante es la clasificación *e identificación de los equipos*. Esta es habitualmente tediosa y difícil debido al volumen del trabajo y a la complejidad y tamaño de los equipos. Una buena clasificación de los equipos es la que se basa en su reemplazabilidad y función.

La obtención de la información que pueda ser relevante para la planificación del mantenimiento es esencial para todos los equipos de la planta. Debido a que el mantenimiento es inseparable de la producción, una vez obtenida la información será posible elaborar un programa para cada equipo y para cada periodo considerado, del tiempo estimado disponible para mantenimiento que no conlleve pérdida de producción (Albiol Colomer, Prades Nebot, & Naranjo Ornedo, 1999).

La mejor *política de mantenimiento* para cada equipo puede ser determinada, primero, identificando las políticas que sean efectivas y, después, decidiendo cuál es la más deseable. La elección dependerá de muchos factores y el criterio de decisión normalmente será el de costo mínimo, esto es, se tiene que poner mucha atención en el tipo de equipo, por ejemplo: equipos de fácil sustitución, equipos de difícil sustitución o equipos no sustituibles.

Cuando los análisis individuales estén terminados interviene un *programa de mantenimiento preventivo*. Aquí se examinarán las acciones relacionadas y las periodicidades en conjunto, con el objeto de encontrar oportunidades de coordinación, esto llevará a un compromiso entre los programas individuales óptimos, el uso más económico de la mano de obra y la máxima disponibilidad de la planta, estos periodos predeterminados deberán tener una tolerancia en tiempo para admitir contingencias tales como la incertidumbre en la planificación de producción

Por otro lado, cuando la planta es nueva, incluso después de haber realizado los análisis mencionados con anterioridad, resulta difícil predecir el nivel y la naturaleza de un *programa de mantenimiento correctivo*. Durante la vida inicial de la planta la predicción es muy imprecisa y dependerá fundamentalmente de la información proporcionada por los

fabricantes y de la experiencia de los ingenieros de planta. La decisión crítica a este respecto es fijar el nivel de repuestos en existencias, el problema del gestor de mantenimiento es minimizar la suma de estos costos, para lo que es esencial identificar las unidades o los equipos críticos en la planta y asegurarse de que se adopta el mejor plan de mantenimiento correctivo.

En general, el mantenimiento predictivo será más eficiente y flexible que cualquiera de los otros tipos de mantenimiento. Cuando haya indicación de deterioro se puede programar la parada del equipo con anterioridad al fallo. Por otra parte, se puede reducir la cantidad de piezas sustituidas innecesariamente con carácter preventivo; mientras que, si las consecuencias del fallo son catastróficas, la condición o parámetro controlado puede ser empleado para indicar un posible fallo inminente antes de que la probabilidad de este sea significativa. Existen dos razones fundamentales para, en ciertas circunstancias, no aplicar el mantenimiento predictivo. Primero, no todas las causas de fallo de la planta pueden ser detectadas con antelación. Segundo, el control de condición es por su propia naturaleza por lo que la necesidad de mano de obra y equipos es más alta su costo, pero que se verá que es más barato por todo lo que se ahorra tanto en tiempos y dinero que se tienen durante la parada de equipos o indisponibilidad (Shaoming & J. Zuo, 2010).

Capítulo 3

Modelo del Sistema

En este capítulo se describe la metodología y construcción de un sistema computacional para mantenimiento preventivo de equipos electromecánicos enfocándose principalmente en el ruido de sus componentes cuando éste se encuentra en operación. La instrumentación o ubicación de los micrófonos orientados hacia los componentes de interés, como ya lo he mencionado, brevemente se almacenó en un archivo los ruidos o señales de los componentes en estado normal, es decir el ruido emitido por ellos se analizan y se tratan en tal forma que se puede considerar dicho resultado como una señal codificada en un conjunto de coeficientes que representan la señal del componente del equipo electromecánico cuando trabaja normalmente. Así una vez instrumentado el equipo en operación con los micrófonos, al capturar la señal de ruido y posteriormente tratada, es decir analizada y representada por sus coeficientes de acuerdo con su representación matemática, la que en esta forma podremos comparar a través de sus componentes con la señal almacenada.

El tratamiento que se da a la señal es utilizando el modelo de tubos resonantes. Cada sección del modelo es un tubo con un diámetro que cambia de acuerdo con el valor (coeficiente de reflexión) que se calcula con el método de correlación de dos señales: una original y la otra predecible (autocorrelación). Cada coeficiente calculado es la función de área de un tubo individual. La concatenación de varios tubos de diferente tamaño representa, de una manera aproximada, la figura geométrica de una fuente sonora, por ejemplo, el ruido de un equipo electromecánico en operación normal. Los 10 coeficientes de reflexión que se obtienen nos sirven para identificar y discriminar un ruido característico de otros (Rodríguez, Iglesias, Marínez, & Muñoz, 1984).

3.1 Metodología del Trabajo

Una vez establecido el plan y conocimiento de la distribución de maquinaria y los componentes que se han seleccionado para capturar las señales de ruido con los micrófonos, se propone la siguiente metodología para el monitoreo de la falla del componente si ocurre (Giannakopoulos & Pikrakis, 2014). Primeramente, generar un archivo con los ruidos de los componentes en cuestión en su estado normal de operación. Es necesario colocar los micrófonos en sitios adecuados para capturar los sonidos que producen los sistemas (ruidos). Además, las señales se deben capturar en intervalos de tiempo predefinidos.

A fin de convertir la señal analógica de tiempo continuo a su representación en el tiempo discreto, ésta debe ser muestreada y cuantizada. El muestreo es la división de la señal en intervalos discretos en el que las lecturas del voltaje analógico serán obtenidas. La cuantización es la conversión del voltaje analógico instantáneo en una representación binaria (Embree & Danieli, 1999). Electrónicamente, esas funciones son ejecutadas por un convertidor analógico digital. La longitud del intervalo de muestra determina la máxima frecuencia que se puede codificar. El teorema de Nyquist-Shannon de muestreo establece que una señal puede ser construida exactamente de su muestra si la muestra de frecuencia es tan grande como el doble de la mayor frecuencia de la señal. La resolución bit usada durante el proceso de cuantización determina el mínimo voltaje que puede ser digitalmente representado, y así el rango dinámico de la señal digital. Como el rango de la dinámica de una señal de audio es, por definición, limitado al ruido, la resolución necesita simplemente ser suficientemente grande para capturar la señal arriba de ese ruido base (Embree & Danieli, 1999) (Giannakopoulos & Pikrakis, 2014).

Cabe decir que las señales obtenidas en tiempo real, y que se procesan con un convertidor analógico-digital deben formar un vector de por lo menos 256 datos. Estos datos se normalizan en punto flotante con el fin de matarlos con algunos de los métodos de procesamiento de señales digitales y obtener así algunos valores representativos de las características de un tipo de ruido. Pensamos que con sólo 10 números es posible tener un pequeño vector que se puede manipular comparándolo con otro vector previamente establecido en una base de datos (Rodríguez, Iglesias, Marínez, & Muñoz, 1984).

En nuestros experimentos utilizamos la transformada de Fourier discreta aplicada a los 256 datos mencionados. Con este método se obtienen como resultado 10 picos, que normalizados tenemos valores entre 0.0 y 1.0, siendo el 1.0 el valor máximo de referencia. Estos mismos resultados se obtienen aplicando el método LPC (*Linear Prediction Code*) o coeficientes de predicción lineal. La diferencia entre la transformada de Fourier y LPC es que éste último tiene una gráfica más suavizada. La desventaja es que se pierden frecuencias altas, las cuales pueden corresponder a “chirridos” más agudos (Proakis & G. Manolakis, 1998) (Lerch, 2012).

Además de los métodos anteriores, experimentamos con otros métodos más sencillos de programar, ellos son: Extracción de parámetros utilizando la energía contenida en la señal. También utilizamos parámetros obtenidos procesando el valor medio del vector, así como su valor promedio. Otro método es detectar los cruces por cero en que transita la señal, pero ésta tiene el inconveniente de que falla cuando la señal es débil (Shaharuddin, Y. Zomaya, & Abu Bakar, *Computing for numerical methods using Visual C++*, 2008).

Con dichos parámetros de entrada se alimenta un manejador de base de datos para comparar el vector obtenido del ruido emitido por la componente con aquellos almacenados en la base de datos de ruidos. Un sistema computacional decide qué clase de operación debe ser aplicada para obtener el resultado el cual se traduce en alguna acción para prevenir la falla en el equipo. De esta forma, podemos considerar básicamente tres clases de ruido: normal, anormal, y peligroso (Schuler & Mahesh, 2005).

3.2 Extracción de los Parámetros

Básicamente es posible alimentar un banco de filtros con la salida de los micrófonos transformada digitalmente mediante convertidores analógicos digitales. Un filtro digital es un sistema (Antoniou, 1993) (Bergen & Antoniou, 2005) que ejecuta operaciones matemáticas sobre una muestra de señal digital en tiempo discreto para reducir o aumentar algunas características de una señal. Mientras que un filtro analógico es un circuito electrónico operando siempre sobre señales analógicas en tiempo continuo. Los filtros pueden ser pasa-bajo, pasa-alta, pasa-banda o de rechazo de banda. Un filtro tipo FIR (*Finite Impulse Response*) sólo contiene un polinomio, es más sencillo y por lo mismo más estable. Mientras que un filtro HR (*Infinite Impulse Response*) contiene dos polinomios, lo que lo convierte en inestable si no se tiene cuidado en su diseño (Theodoridis & Koutroumbas, 2008) (Otto & Denier, 2005).

Una máquina cuando funciona correctamente produce un ruido característico de su buen funcionamiento. A partir de este sonido, un experto humano puede inferir el estado funcional de dicha máquina. Sin embargo, para realizar lo anterior de una manera automática es necesario capturar el sonido y hacer un procesamiento digital de la señal con el fin de extraer algunos coeficientes numéricos, de tal forma que el sistema digital pueda distinguir entre una señal y la otra.

Con estos parámetros construimos un filtro para separar algunas frecuencias características de un tipo de sonido. Para diseñar un filtro analógico normalmente se utiliza las transformadas de Laplace y Fourier, mientras que para diseñar un filtro digital se utilizan la transformada discreta de Fourier y la transformada Z. Pero también podemos utilizar solamente las funciones de $\sin(x)$ y $\cos(x)$, entre otras menos conocidas (Hamming, 1989) (Otto & Denier, 2005).

Un filtro ya sea analógico o digital tiene sus representaciones equivalentes en la naturaleza de una manera física. Por ejemplo, un circuito resonante RLC (Figura 3), un resonador Helmholtz, un sistema masa resorte, la sección de un tubo (Figura 4), el tracto vocal, y en general, cualquier fenómeno físico que involucre movimientos ondulatorios formales y físicos.

En suma, cualquier filtro puede ser descrito por una función de transferencia que relaciona la salida con la entrada ($H(s)$, $H(z)$, etc.) (Monson H. H., 1999).

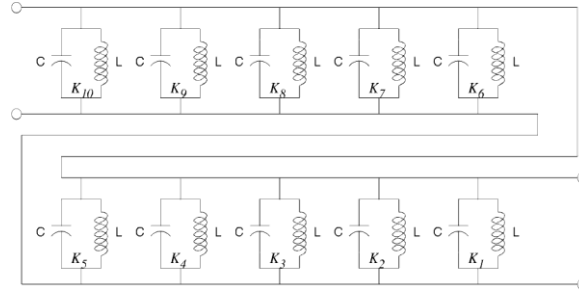


Figura 3: Modelo eléctrico equivalente. Elaboración propia

Utilizando el análisis de predicción lineal es posible extraer de una señal varios componentes numéricos que pueden servir para el reconocimiento de patrones de señal de sonido: (a) los coeficientes de predicción lineal; (b) las raíces de un polinomio predictor; (c) coeficientes cástrales; (d) la respuesta a un impulso del filtro; (e) coeficientes de autocorrelación; (f) coeficientes de autocorrelación de los coeficientes; (g) coeficientes de una función logarítmica del área de un tubo acústico; (h) la energía de la señal; y (i) los coeficientes de reflexión de una onda sonora dentro de un tubo (Rabiner & Schafer, Digital Processing of Speech Signals, 1978) (Rabiner L. J., 1993).

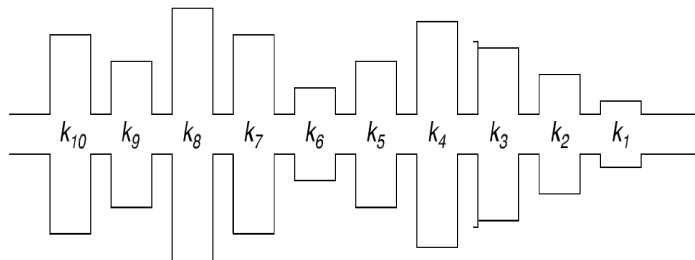


Figura 4: Modelo con tubos. Elaboración propia

3.3 Programación del modelo

Para construir nuestro modelo necesitamos los coeficientes de reflexión. Éstos se obtienen extrapolando el valor de una muestra de señal $\tilde{x}(n)$ desde k muestras anteriores $x(n-1)$, $x(n-2)$, ..., $x(n-k)$. Para ello se minimiza el error que existe entre $\tilde{x}(n)$ y $x(n-i)$ utilizando *mínimos cuadrados* para calcular el *error cuadrático medio* E dentro de un intervalo n de N muestras máximo. De esta manera, los coeficientes así obtenidos al forman un vector representativo de una señal sonora de entrada (Ingle Vinay & Proakis, 2007).

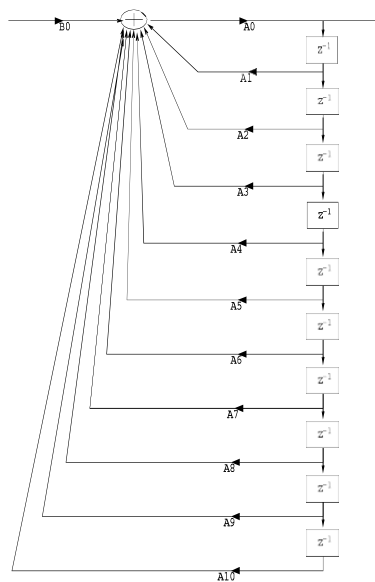


Figura 5: Modelo en forma directa del filtro todo polos. Elaboración propia

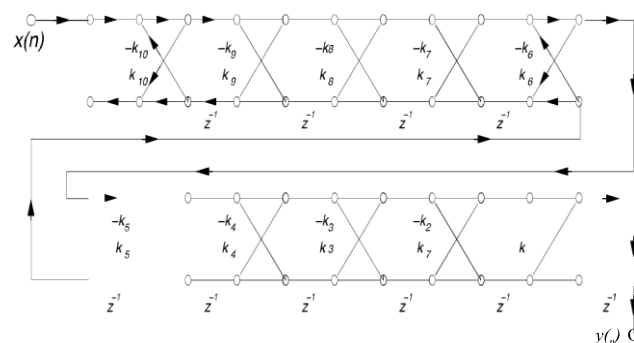


Figura 6. Modelo con filtro latencia todo polos. Elaboración propia

Un filtro todo polo es un filtro FIR (*Finite Impulse Response*) que en nuestro caso funciona como un filtro inverso (Kehtarnavaz, 2008). En la Figura 6 se muestra la

estructura de este filtro. Un filtro fatico todo polo es una cascada de redes de dos puertos. Una red de dos puertos se define por el valor de sus coeficientes de reflexión. En la Figura 5 se muestra la estructura Latice con 10 coeficientes de reflexión. La función que relaciona la entrada con la salida es:

$$H(z) = \frac{1}{A(z)}$$

Para 10 coeficientes, la ecuación de diferencias correspondiente es:

$$Y(n) = b_0x(n) - a_0y(n) - a_1y(n-1) - a_2y(n-2) - \dots - a_9y(n-9) - a_{10}y(n-10)$$

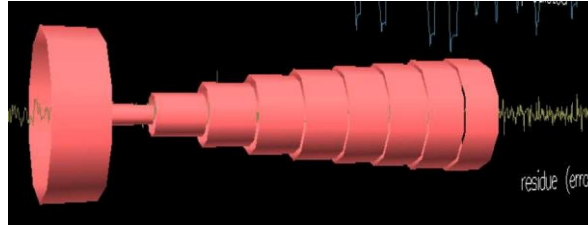


Figura 7: Modelado tubos en tiempo real con *rt_lpc.exe*. Elaboración propia

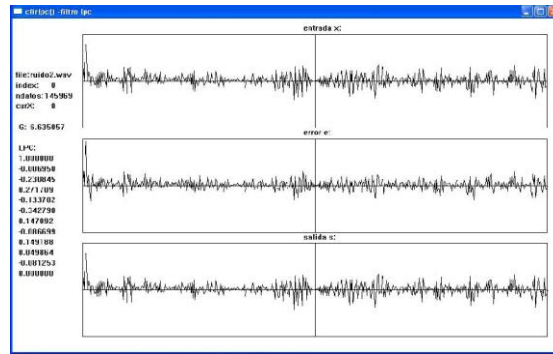


Figura 8: Señal original, error, y la señal reconstruida. Elaboración propia

Además de lo expuesto, existe una equivalencia entre una estructura de filtro Latice Figura 6, una red eléctrica que contiene varios circuitos tanque resonantes Figura 3, y un modelo de tubos resonantes Figura 4. Utilizando la aplicación de Ananya Misra, Ge Wang y Perry Cook, muestra un patrón de ruido capturado en tiempo real Figura 7. Por otro lado, la Figura 8 se muestra una señal de ruido original, la señal de error que se obtiene calculando los coeficientes de predicción, y la señal de salida que se obtiene con un filtro que utiliza como parámetros a dichos coeficientes.

En el laboratorio, utilizando el método de Levinson-Durbin, calculamos 10 coeficientes de reflexión y 10 coeficientes de predicción. Para esto, programamos en C/C++, las siguientes funciones: (a) *getfac()*, calcular los valores de autocorrelación de la señal; (b) *getcre f()*, calcular los coeficientes de reflexión; (c) *getlpc()*, calcular los coeficientes de reflexión. Estas y otras funciones de apoyo son controladas por un programa principal (*test.c*). En la Figura 8 se puede ver tres señales: la señal original, el error producido al calcular los coeficientes, y la señal de salida la cual se recupera utilizando un filtro cuyos parámetros son los coeficientes de predicción lineal (Shaharuddin, Zomaya, Stephan, & Sanugi, 2005). Por otro lado, en el Tabla 2 se muestran los coeficientes de reflexión obtenidos, y en el Tabla 3 se muestran los coeficientes de predicción que se obtuvieron a partir de una fuente de señal ruidosa producida por un motor de inducción. Con una aplicación externa (*rtlpc*) se puede apreciar en la Figura 7 un tubo el cual corresponde a la susodicha señal ruidosa. Finalmente, en el anexo se muestra el código fuente más relevante de nuestro sistema.

Capítulo 4

Algunos Conceptos del Procesamiento Digital de Señales

Para construir sistemas de reconocimiento de sonidos ruidosos es necesario diseñar modelos formales de estos sistemas (Proakis & G. Manolakis, 1998). Esto se logra utilizando técnicas de procesamiento de señales tanto analógicas como digitales con el fin de obtener algunos parámetros numéricos que representen algún tipo de señal de audio (Lions, 2012). Es posible utilizar varias técnicas numéricas como son la Transformada de Fourier (rápida o discreta), filtros de señal (analógicos o digitales), parámetros extraídos de un vector de señales digitales (energía, media, promedio, cruces por cero, entre otros), o bien, coeficientes de predicción lineal. Dichos parámetros alimentan un sistema de selección o clasificación de señales como pueden ser redes neuronales, cadenas de Márkov ocultas, algoritmos genéticos, expresiones regulares, entre otros métodos de la Inteligencia Artificial. En este trabajo sólo utilizaremos algunos métodos básicos de procesamiento de señales digitales: Filtros Digitales, Transformada de Fourier, y Coeficientes de Predicción Lineal (Rorabaugh C. , 1993) (Ambardar , 2002).

4.1. Filtros Lattice FIR Todo-Polos

En sistemas de tiempo real que implementan la síntesis de señales, es necesario que el tiempo de respuesta sea siempre lo menos posible (Woods, McAllister, Yi, & Lightbody, 2008). Esto se logra utilizando algoritmo que realicen una tarea específica, por ejemplo, reproducir ruido blanco, ruido rosa, chirridos entre muchos otros. (Chassing , Digital Signal Processing: Laboratory Experiments Using C and the TMS320C31DSK, 1999) (Chassing , DSP Applications Using C and the TMS320C6x DSK, 2002)

Un filtro Lattice todo polo es una red en cascada de dos puertos. Tiene las siguientes propiedades: (a) modularidad, (b) baja sensibilidad a los efectos de cuantización escalando los parámetros, (c) estabilidad, (d) se usa en análisis de síntesis de señales debido a que requiere de pocos coeficientes (puede modelar señales simples en tiempo real), (e) síntesis y análisis de voz, (d) un Lattice todo cero es un filtro Lattice tipo

FIR. y (f) un Latice escalera es un filtro tipo IIR (Ingle Vinay & Proakis, 2007).

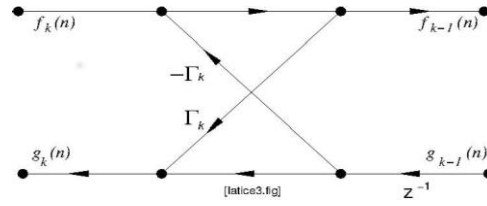


Figura 9: Red de 2 puertos para kth etapas de un filtro Latice todo polo. Elaboración propia

Una red de 2 puertos está definida por los coeficientes de reflexión denotados por Γ (gama) (Hayes , 1999)

Tiene dos entradas,

$$f_{k-1}(n)$$

$$g_{k-1}(n)$$

y dos salidas

$$f_k(n)$$

$$g_k(n)$$

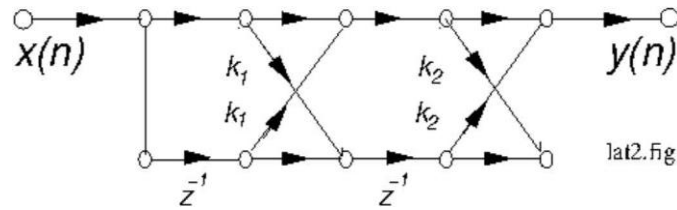


Figura 10: Etapas de p Matices. Elaboración propia

Ambas están relacionadas por dos ecuaciones de diferencias acopladas

$$\begin{aligned} f_k(n) &= f_{k-1}(n) + \Gamma_k [g_{k-1}(n-1)] \\ g_k(n) &= g_{k-1}(n-1) + \Gamma_k [f_{k-1}(n)] \end{aligned} \quad (4.1)$$

la primera sección siempre será

$$x(n) = f_0(n) = g_0(n)$$

La función del sistema $A_k(z)$ conecta la entrada $x(n)$ con la salida $f_k(n)$

$$F_k(z) = A_k(z) \cdot X(z) \quad (4.2)$$

Esta ecuación de diferencias 4.2 puede resolverse por inducción con el fin de mantener la siguiente fórmula recursiva para $A_k(z)$ llamada recursión set-up, la cual se inicializa con $A_0(z) = 1$:

$$A_k(z) = A_{k-1}(z) + \Gamma_k(z^{-k})A_{k-1}(z^{-1}) \quad (4.3)$$

La expresión 4.3 también define una relación recursiva para los coeficientes $a_k(i)$ de $A_k(z)$

$$\begin{aligned} a_k(i) &= a_{k-1}(i) + \Gamma_k a_{k-1}(k-i) \\ i &= 1, 2, 3, \dots, k-1 \\ a_k(k) &= \Gamma_k \end{aligned}$$

Los coeficientes de reflexión k_n se definen también como una función recursiva (Hayes, 1999).

$$\begin{aligned} A_{k-1}(z) &= \frac{1}{1 - (\Gamma_k)^2} [A_k(z) - \Gamma_k z^{-k} \cdot A_k(z^{-1})] \\ \text{para } k &= p, p-1, p-2 \dots 1 \end{aligned}$$

en términos de coeficientes a_i ,

$$\begin{aligned} a_{k-1}(i) &= \frac{1}{1 - (\Gamma_k)^2} [a_k(i) - \Gamma_k z^{-k} \cdot A_k(z^{-1})] \\ \text{para } k &= p, p-1, p-2 \dots 1 \end{aligned}$$

$$a_{k-1}(k-1) = \Gamma_{k-1}$$

El polinomio $A_k(z)$ define los coeficientes igualando $\Gamma_k = a_k(z)$

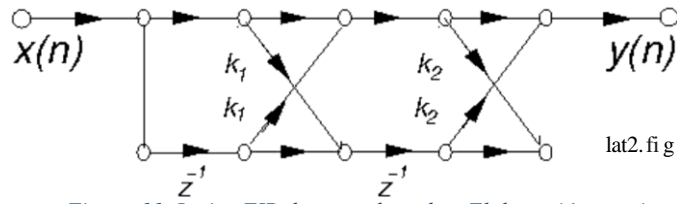


Figura 11. Lattice FIR de segundo orden. Elaboración propia

4.2 Filtro Pasa Bajo con Series de Fourier

Sea la función de transferencia:

$$H_d(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega T} \quad |n| < \infty$$

$$H_d(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\pi v} \quad |n| < \infty$$

Donde:

$$\begin{aligned} C_n &= \text{coeficientes de fourier.} \\ F_s &= \text{frecuencia de muestreo.} \\ F_N &= \text{frecuencia de Nyquist} = F_s/2 \\ v &= \text{frecuencia variable normalizada} = f/F_s \\ \omega T &= \frac{2\pi f}{F_s} = \pi v \quad \text{para } |v| < 1 \end{aligned}$$

Los coeficientes C_n están definidos como

$$\begin{aligned} C_n &= \frac{1}{2} \int_{-1}^1 H_d(v) e^{-jn\pi v} dv \\ &= \frac{1}{2} \int_{-1}^1 H_d(v) (\cos n\pi v - j \sin n\pi v) dv \end{aligned} \quad (4.5)$$

sí $H_d(v)$ es una función par (frecuencia selectiva del filtro) la ecuación 4.5 queda como:

$$C_n = \int_0^1 H_d(v) \cos n\pi v \, dv \quad n \geq 0 \quad (4.6)$$

sí $H_d(v) \sin n\pi v$ es una función non

$$\int_{-1}^1 H_d(v) \sin n\pi v \, dv = 0 \quad (4.7)$$

con

$$C_n = C_{-n}$$

Para obtener un filtro realizable truncamos 4.4, así

$$H_a(z) = \sum_{n=-Q}^Q C_n e^{jn\pi v} \quad (4.7)$$

si $z = e^{jn\pi v}$

$$H_a(z) = \sum_{n=-Q}^Q C_n z^n \quad (4.8)$$

los coeficientes (orden del filtro) de respuesta al impulso son:

$$C_{-Q}, C_{-Q+1}, \dots, C_{-1}, C_0, C_1, \dots, C_{Q-1}, C_Q$$

introduciendo un retardo de las muestras Q tenemos que

$$H(z) = z^{-Q} H_a(z) = \sum C_n z^{n-Q} \quad (4.9)$$

si $n - Q = -i$, la expresión 4.9 queda como

$$H(z) = \sum_{i=0}^{2Q} C_{Q-i} z^{-i} \quad (4.10)$$

si $h_i = C_Q$ y $N - 1 = 2Q$, la expresión 4.10 será

$$H(z) = \sum_{i=0}^{N-1} h_i z^{-i} \quad (4.11)$$

$H(z)$ se expresa en términos de respuesta al impulso de los coeficientes h_i lo que

$$h_0 = C_Q, h_1 = C_{Q-1}, \dots, h_Q = C_0, \\ , h_{Q+1} = C_{-1} = C_1, \dots, h_{2Q} = C_{-Q}$$

los coeficientes C_Q son simétricos respecto a h_Q , es decir $C_n = C_{-n}$. El orden del filtro es

$$N = 2Q + 1$$

Si $Q = 5$ el filtro tiene 11 coeficientes h_0, h_1, \dots, h_{10} es decir

$$h_0 = h_{10} = C_5$$

$$h_1 = h_9 = C_4$$

$$h_2 = h_8 = C_3$$

$$h_3 = h_7 = C_2$$

$$h_4 = h_6 = C_1$$

$$h_5 = C_0$$

Filtro pasa bajo.

Demostrar que

$$C_n = \int_0^{v_1} H_d(v) \cos n\pi v \, dv = \frac{\sin n\pi v_1}{n\pi}$$

sabemos que

$$\cos n\pi v = \frac{e^{jn\pi v} + e^{-jn\pi v}}{2}$$

$$C_n = \int_0^{v_1} H_d(v) \left[\frac{e^{jn\pi v} + e^{-jn\pi v}}{2} \right] dv$$

$$C_n = \frac{1}{2} \int_0^{v_1} H_d(v) \left[e^{jn\pi v} + e^{-jn\pi v} \right] dv$$

$$C_n = \frac{H_d(v)}{2} \int_0^{v_1} \left[e^{jn\pi v} + e^{-jn\pi v} \right] dv$$

por fórmula:

$$\int e^{ax} dx = \frac{e^{ax}}{a} \quad (14.509)$$

si

$$a = jn\pi,$$

$$-a = -jn\pi,$$

$$x = v$$

$$C_n = \frac{H_d(v)}{2} \left[\frac{e^{jn\pi v}}{jn\pi} \Big|_0^{v_1} + \frac{e^{-jn\pi v}}{-jn\pi} \Big|_0^{v_1} \right]$$

evaluando límites

$$\begin{aligned} C_n &= \frac{H_d(v)}{2} \left[\left(\frac{e^{jn\pi(v_1)}}{jn\pi} - \frac{e^{jn\pi(0)}}{jn\pi} \right) + \left(\frac{e^{-jn\pi(v_1)}}{-jn\pi} - \frac{e^{-jn\pi(0)}}{-jn\pi} \right) \right] \\ &= \frac{H_d(v)}{2} \left[\left(\frac{e^{jn\pi(v_1)}}{jn\pi} - \frac{e^{jn\pi(0)}}{jn\pi} \right) + \left(-\frac{e^{jn\pi(v_1)}}{jn\pi} + \frac{e^{-jn\pi(0)}}{jn\pi} \right) \right] \\ &= \frac{H_d(v)}{2} \left[\frac{e^{jn\pi(v_1)}}{jn\pi} - \frac{e^{jn\pi(0)}}{jn\pi} - \frac{e^{-jn\pi(v_1)}}{jn\pi} + \frac{e^{-jn\pi(0)}}{jn\pi} \right] \\ &= \frac{H_d(v)}{2} \left[\frac{e^{jn\pi(v_1)}}{jn\pi} - \cancel{\frac{1}{jn\pi}} - \frac{e^{-jn\pi(v_1)}}{jn\pi} + \cancel{\frac{1}{jn\pi}} \right] \\ &= \frac{H_d(v)}{2} \left[\frac{e^{jn\pi v_1}}{jn\pi} - \frac{e^{-jn\pi v_1}}{jn\pi} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{H_d(v)}{2} \left[\frac{e^{jn\pi v_1} - e^{-jn\pi v_1}}{jn\pi} \right] \\
C_n &= H_d(v) \left[\frac{e^{jn\pi v_1} - e^{-jn\pi v_1}}{2j} \right] \left(\frac{1}{n\pi} \right)
\end{aligned}$$

por fórmula:

$$\sin \theta = \left[\frac{e^{j\theta} - e^{-j\theta}}{2j} \right] \quad (7.17)$$

$$C_n = H_d(v) \left[\sin n\pi v_1 \right] \left(\frac{1}{n\pi} \right)$$

$$\boxed{C_n = \frac{\sin n\pi v_1}{n\pi}} \quad (4.12)$$

Ejemplo: Calcular los coeficientes C_n para un filtro FIR pasa bajo de acuerdo con:

Número de muestras	Q	$= 5$
Orden del filtro	N	$= 2Q + 1$
		$= 11$
Frecuencia de corte	f_c	$= 1000$
Frecuencia de muestreo	F_s	$= 11025$
Frecuencia de Nyquist	F_N	$= F_s/2$
		$= 11025/2$
		$= 5512.5$
Primer coeficiente de fourier	C_0	$= v_1$
		$= f_c/F_N$
		$= 1000/5512.5$
	C_0	$= 0.1814$

Utilizando la expresión 4.12

$$C_n = \frac{\sin(0.1814)n\pi}{n\pi} \quad (4.10)$$

si

$$h_i = C_{Q-i}$$

$$C_n = C_{-n}$$

$$Q = 5$$

Utilizando la expresión 4.13

i	$Q - i$	$Q + i$	h_{Q-i}	h_{Q+i}	C_{Q-i}	$H(v)$
0	5	5		h_5	C_0	0.1814
1	4	6	h_4	h_6	C_4	0.1717
2	3	7	h_3	h_7	C_3	0.1446
3	2	8	h_2	h_8	C_2	0.1051
4	1	9	h_1	h_9	C_1	0.0604
5	0	10	h_0	h_{10}		0.0000

4.3 Filtro Pasa Bajo Básico

Utilizando el método de divisor de voltaje, y de acuerdo con el circuito de la Figura 4.4, podemos obtener su función de transferencia. veamos,

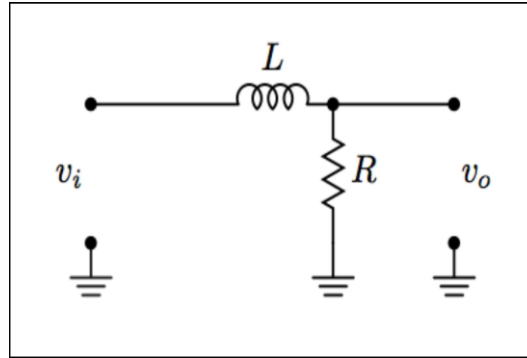


Figura 12: Filtro Analógico Base. Elaboración propia

por división de voltaje,

$$v_o = \frac{v_i R}{X_L + R}$$

cambiando v_i

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{R}{X_L + R}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{R}{2\pi fL + R}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{\frac{R}{L}}{\frac{2\pi fL}{L} + \frac{R}{L}}$$

de esta manera, para cualquier valor constante R-L

$$\frac{v_0}{v_i} = \frac{\frac{R}{L}}{2\pi f + \frac{R}{L}}$$

o bien

$$\frac{v_0}{v_i} = \frac{\frac{R}{L}}{\omega + \frac{R}{L}}$$

la magnitud de $\left|\frac{v_o}{v_i}\right|$ es

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| = \sqrt{\frac{\left(\frac{R}{L}\right)^2}{(\omega)^2 + \left(\frac{R}{L}\right)^2}}$$

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| = \frac{\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2}}{\sqrt{(\omega)^2 + \left(\frac{R}{L}\right)^2}}$$

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| = \frac{\frac{R}{L}}{\sqrt{(\omega)^2 + \left(\frac{R}{L}\right)^2}}$$

Así que

$$X_L = 2\pi f L$$

$$L = 1 H$$

$$R = 1 \Omega$$

$$f = 1 Hz$$

$$\frac{v_0}{v_i} = H(f)$$

$$\omega = 2\pi f$$

La función de transferencia H(f) es

$$H(f) = \frac{1}{2\pi f + 1}$$

La función de transferencia H(w) es

$$H(\omega) = \frac{1}{\omega + 1}$$

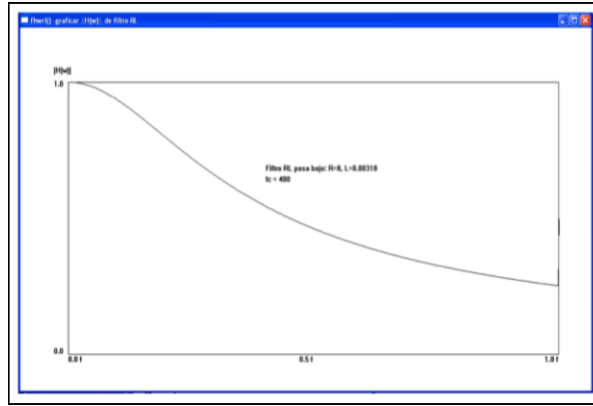


Figura 13: Gráfica para la expresión 4.14 con $R=8\Omega$, $L=0.000318$ Hy $f_c = 400$ Hz. Elaboración propia

La función de transferencia $H(s)$. De la expresión 4.15 ω es un número complejo (respuesta en frecuencia)

$$s = j\omega$$

entonces 4.15 se convierte en

$$H(s) = \frac{1}{s+1} \quad (4.16)$$

Función de transferencia $H(z)$ a partir de $H(s)$. Utilizando la Transformación Bilineal se obtiene $H(z)$ sustituyendo s en la expresión (4.16).

$$s = \frac{z-1}{z+1}$$

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{1}{s+1} \\ H(z) &= \frac{1}{\left(\frac{z-1}{z+1}\right)+1} \\ &= \frac{(z+1)}{\left(\frac{z-1}{z+1}\right)(z+1) + (z+1)} \\ &= \frac{z+1}{z-1+z+1} \\ &= \frac{z+1}{z+z-1+1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{z+1}{z+z} \\
 &= \frac{z+1}{2z} \\
 &= \frac{z}{2z} + \frac{1}{2z} \\
 H(z) &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2}z^{-1}
 \end{aligned}$$

de esta manera

$$H(z) = 0,5 + 0,5z^{-1}$$

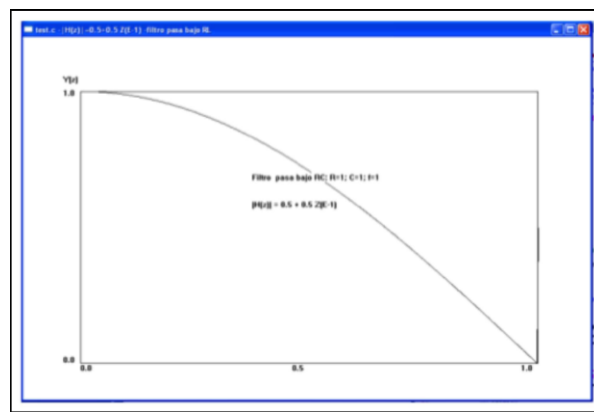


Figura 14: Graficas para la expresión 4.17. Elaboración propia

Ecuación de diferencias. Utilizando la Expresión 4.17 para obtener $y(n)$.
Si

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = 0,5 + 0,5z^{-1}$$

separando $X(z)$

$$Y(z) = [0,5 + 0,5z^{-1}]X(z)$$

$$Y(z) = 0,5X(z) + 0,5z^{-1}X(z)$$

queda

$$y(n) = 0,5x(n) + 0,5x(n-1)$$

4.4 Filtro Digital Real Pasa Bajo

Utilizando el método de Transformación Bilineal, diseñar un filtro pasa bajo con frecuencia de corte de 5000 Hz. muestreada a una frecuencia de 11025 Hz (Hamming, 1989) (White, 2000).

(1) Seleccionar la función de transferencia apropiada $H(s)$, la cual representa un filtro pasa bajo con un ancho de banda unitario $\bar{\omega} \left(1 \frac{r}{s}\right)$

$$H(s) = \frac{1}{s+1} \quad (4.19)$$

(2) Preparar W_D utilizando

$$\boxed{\omega_A = \frac{2}{T} \tan\left(\frac{\omega_D T}{2}\right)} \quad (4.20)$$

$$F_s = 11025$$

$$F_c = 5000$$

$$T = 1/F_s$$

$$= 1/11025$$

$$T = 0,00009070$$

$$W_D = 2 \cdot \pi \cdot F_c$$

$$= (2)(\pi)(F_c)$$

$$= (2)(3,1416)(5000)$$

$$W_D = 31415,92 \text{ rad/sg}$$

utilizando la Expresión 4.20 para el valor de

$$\begin{aligned}
 \omega_A &= \frac{2}{T} \cdot \tan\left(\frac{\omega_D T}{2}\right) \\
 &= \frac{2}{\frac{1}{11025}} \cdot \tan\left(\frac{(31415,9 \cdot \frac{1}{11025})}{2}\right) \\
 &= \frac{2}{0,00009070} \cdot \tan\left(\frac{(31415,9)(0,00009070)}{2}\right) \\
 &= 22050 \cdot \tan\left(\frac{(2,849)}{2}\right) \\
 &= 22050 \cdot \tan(1,4247) \\
 &= 22050(6,7965) \\
 \omega_A &= 149864,9
 \end{aligned}$$

(3) Escalar la Expresión 4.19 para obtener $H(z)$ utilizando la Transformación Bi- lineal. Veamos:

$$\begin{aligned}
 H(s) &= \frac{1}{s+1} \\
 &= \frac{1}{\frac{s}{\omega} + 1} \\
 H(s) &= \frac{\omega}{s + \omega}
 \end{aligned}$$

$$H(s) = \frac{\omega}{s + \omega} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned}
 s &= c \frac{z-1}{z+1} \\
 c &= \frac{2}{T}
 \end{aligned}$$

sustituyendo s y c en la expresión 4.21 para obtener 4.22,

$$H(z) = \frac{\omega}{c \frac{z-1}{z+1} + \omega} \quad (4.22)$$

multiplicando por (z+1)

$$H(z) = \frac{\omega(z+1)}{c \frac{(z-1)}{(z+1)}(z+1) + \omega(z+1)}$$

dividiendo por (c + m)

$$\begin{aligned} H(z) &= \frac{\frac{\omega}{(c+\omega)}(z+1)}{\frac{z(c+\omega)}{(c+\omega)} - \frac{(c-\omega)}{(c+\omega)}} \\ &= \frac{\frac{\omega}{(c+\omega)}(z+1)}{z - \frac{(c-\omega)}{(c+\omega)}} \\ H(z) &= \left(\frac{\omega}{c+\omega} \right) \left(\frac{(z+1)}{z - \frac{(c-\omega)}{(c+\omega)}} \right) \end{aligned}$$

finalmente tenemos,

$$\boxed{H(z) = \frac{\omega}{c+\omega} \cdot \frac{z+1}{z - \frac{c-\omega}{c+\omega}}} \quad (4.23)$$

sustituyendo valores en la expresión (4.23) para

$$\omega = \omega_A = 149864,9$$

$$\begin{aligned} H(z) &= \frac{149864,9}{22050,7 + 149864,9} \cdot \frac{z+1}{z - \frac{22050,7-149864,9}{22050,7+149864,9}} \\ &= \frac{149864,9}{171915,6} \cdot \frac{z+1}{z - \frac{-127814,2}{171915,6}} \\ H(z) &= 0,8717 \cdot \frac{z+1}{z+0,743} \end{aligned}$$

reordenando,

$$H(z) = \frac{0,8717z + 0,8717}{z + 0,743}$$

dividiendo por z para finalmente obtener,

$$H(z) = \frac{0,8717}{1} + \frac{0,8717 z^{-1}}{0,743 z^{-1}} \quad (4.24)$$

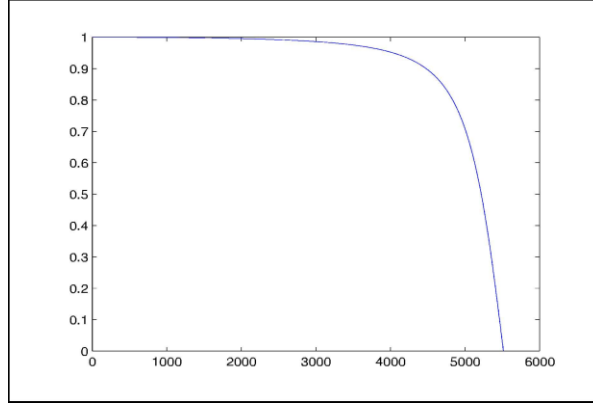


Figura 15: Gráficas para la Expresión 4.24. Elaboración propia

Ecuación de diferencias para la expresión (4.24) para obtener p(n).

$$\begin{aligned} H(z) &= \frac{Y(z)}{X(z)} \\ \frac{Y(z)}{X(z)} &= \frac{0,8717 + 0,8717z^{-1}}{1 + 0,743z^{-1}} \\ Y(z)[1 + 0,743z^{-1}] &= X(z)[0,8717 + 0,8717z^{-1}] \\ Y(z) + 0,743Y(z)z^{-1} &= 0,8717X(z) \\ &\quad + 0,8717X(z)z^{-1} \\ Y(z) &= 0,8717X(z) \\ &\quad + 0,8717X(z)z^{-1} \\ &\quad - 0,743Y(z)z^{-1} \end{aligned}$$

$$y(n) = 0,8717x(n) + 0,8717x(n-1) - 0,743y(n-1)$$

(4.25)

4.2 Coeficientes de Predicción Lineal

“LPC (*Linear Prediction code*), o Código por Predicción Lineal, es un método numérico que permite obtener parámetros que muestran un espectro suavizado de la información más representativa de una señal de audio. Proporciona un modelo adecuado de las señales producidas por generadores de sonido pseudoaleatorios, por lo que es adecuado para implementarse en sistemas computacionales”.

“Los coeficientes $a_0, a_1, a_2, \dots, a_i$, se obtienen extrapolando una muestra de señal $\tilde{x}(n)$ a partir de las k muestras anteriores $x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-k)$. Funciona minimizando el error entre $\tilde{x}(n)$ y $x(n-i)$ utilizando mínimos cuadrados calculando el *error cuadrático medio* E dentro de un intervalo de n muestras. Los coeficientes obtenidos a_i , forman un vector representativo de una señal sonora de entrada.

$$\tilde{x}(n) = \sum_{i=1}^k a_i \cdot x(n-i) \quad (4.26)$$

$$E = \sum_n e^2(n) = x(n) - \sum_{i=1}^k a_i \cdot x(n-i) \\ \text{para } 0 \leq n \leq N-1$$

$$\tilde{x}(n) = \sum_{i=1}^k a_i \cdot x(n-i)$$

$$E = \sum_n e^2(n) = x(n) - \sum_{i=1}^k a_i \cdot x(n-i)$$

$$\text{para } 0 \leq n \leq N-1$$

donde:

$x(n)$	muestra de referencia (señal original)
$\tilde{x}(n)$	muestra predicha
n	intervalo de las muestras
i	índice de una muestra anterior
k	máximo de muestras anteriores
a_i	coeficiente de una muestra
N	tamaño de un conjunto de muestras
E	mínimo valor cuadrático medio.

Resolviendo E para $a_j \mid 1 \leq j \leq k$

$$\frac{\partial E}{\partial a_j} = 0 \quad 1 \leq j \leq k$$

$$\begin{aligned} \sum_n x(n-j) \cdot \left[x(n) - \sum_{i=1}^k a_i \cdot x(n-i) \right] = \\ \sum_n x(n-j) \cdot x(n) - \sum_{i=1}^k a_i \cdot \sum_n x(n-j) \cdot x(n-i) = \end{aligned}$$

$$C_{j0} - \sum_{j=1}^k a_i \cdot C_{ji}$$

donde:

$$C_{ji} = \sum_n x(n-j) \cdot x(n-i)$$

Colocando una ventana rectangular en el intervalo $0 < n < N - 1$, se anulan las muestras que se encuentran fuera de dicho intervalo limitando el valor de n . Si de esto resulta que $C_{ij} = C_{ji} = r_{|i-j|}$, entonces los valores de $r_{|i-j|}$ son los coeficientes de una matriz de *autocorrelación* Toeplitz que se resuelve con el método recursivo de *Levinson-Durbin*.

$$\sum r_n(|j-i|) \cdot a_i = r_n(j) \quad 1 \leq j \leq k$$

o de manera matricial,

$$\begin{bmatrix} r_n(0) & r_n(1) & r_n(2) & \dots & r_n(k-1) \\ r_n(1) & r_n(0) & r_n(1) & \dots & r_n(k-2) \\ r_n(2) & r_n(1) & r_n(0) & \dots & r_n(k-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_n(k-1) & r_n(k-2) & r_n(k-3) & \dots & r_n(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_n(1) \\ r_n(2) \\ r_n(3) \\ \vdots \\ r_n(k) \end{bmatrix}$$

ALGORITMO LEVINSON-DURBIN

$$(1) E^{(0)} = R(0)$$

$$(2) k_i = \frac{r(i) - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j^{(i-1)} \cdot r(|i-j|)}{E^{(i-1)}} \quad \text{para } 1 \leq j \leq p$$

$$(3) \alpha_i^{(i)} = k_i$$

$$(4) \alpha_j^{(i)} = \alpha_j^{(i-1)} - k_i \cdot \alpha_{i-j}^{(i-1)} \quad \text{para } 1 \leq j \leq (i-1)$$

$$(5) E^{(i)} = (1 - k_i^2) \cdot E^{(i-1)}$$

$E^{(i)}$ = error de prediccion de orden

i = orden del predictor

$r(i)$ = valor de autocorrelacion

$\alpha_j^{(i)}$ = coeficientes LPC

k_i = coeficientes PARCOR

p = maximo numero de coeficientes LPC

m = indice de coeficientes

a_m = coeficientes LPC = $\alpha_m^{(p)} \quad 1 \leq m \leq p$

k_m = coeficientes PARCOR

g_m = log de los coeficientes de relacion de area

$$= \log \left(\frac{1 - k_m}{1 + k_m} \right)$$

Se puede decir que utilizando el análisis de predicción lineal es posible diseñar un autómata

de estados finitos con la señal de sonido capturada por el micrófono, y ésta compararla con las obtenidas en la base de datos bajo una tolerancia digamos ϵ_1 , de tal forma que si esta diferencia excede a la tolerancia ϵ_1 se irá al siguiente estado para identificar un sonido ruidoso que será comparado también con la base de datos bajo una tolerancia ϵ_2 , que indicará que hay posible sonido ruidoso que será comparado también con la base de datos bajo una tolerancia ϵ_2 , que indicará que hay posible defecto del sistema que emite la señal.

Debe recordarse que la señal de entrada se normaliza en el rango $[-1,1]$ con el propósito de disminuir el error y hacer más fácil la comparación. También si al entrar la señal de sonido $A'' = [a_0, a_1, a_2, \dots, a_9]$ en ese momento no cumple con las tolerancias ϵ_3 después de un número de ciclos en el estado 4 continuará al estado 3 de mantenimiento.

Es conveniente mencionar, lo que se entiende por un autómata de estados finitos. Un autómata de estado finito es un modelo computacional que realiza cálculos en forma automática sobre una entrada para producir una salida.

Este modelo está conformado por un alfabeto, un conjunto de estados finito, una función de transición, un estado inicial y un conjunto de estados finales. Su funcionamiento se basa en una función de transición, que recibe a partir de un *estado inicial* una cadena de caracteres pertenecientes al alfabeto (la entrada), y que va leyendo dicha cadena a medida que el autómata se desplaza de un estado a otro, para finalmente detenerse en un *estado final o de aceptación*, que representa la salida.

Un autómata finito es una Quintuple $(Q, \Sigma, q_0, \delta, F)$ en donde

- Q es un conjunto finito de estados
- Σ es un alfabeto finito
- q_0 es el estado inicial
- δ es una función de transición
- F es un conjunto de estados finales o de aceptación.

El modelo del sistema SCMP, como una representación como diagramas de estados, se

ilustra a continuación, considerando como alfabeto, las señales de sonido y los estados como situaciones de la señal en ventanas de 256 datos, ya procesados, el estado final es considerado como aquel en el que se tiene que dar mantenimiento al componente, por la señal de sonido no permitida.

El modelo del sistema SCMP, como una representación como diagramas de estados, se ilustra a continuación, considerando como alfabeto, las señales de sonido y los estados como situaciones de la señal en ventanas de 256 datos, ya procesados, el estado final es considerado como aquel en el que se tiene que dar mantenimiento al componente, por la señal de sonido no permitida.

Este autómata finito está definido sobre el alfabeto:

$$\Sigma = \{A = [a_0, a_1, a_2, \dots, a_9], A' = [a_0, a_1, a_2, \dots, a_9], A'' = [a_0, a_1, a_2, \dots, a_9]\},$$

Posee 4 estados:

$$q_1, q_2, q_3, q_4, \text{ y}$$

Sus transiciones son:

$$\delta(q_1, A) = q_1, \delta(q_2, A') = q_2, \delta(q_2, A'') = q_3, \delta(q_2, A'') = q_3, \text{ y } \delta(q_4, A'') = q_3$$

este último es el estado muerto o estado final.

Los autómatas finitos se pueden representar mediante *diagramas de estados* finitos.

4.6 Tabla de transición de estados

Otra manera de describir el funcionamiento de un autómata finito es mediante el uso de tablas de transiciones o matrices de estados, como se muestra, en donde σ son las *señales* A, A', A''

Tabla 1: Tabla de transición de estado

salida $q \in Q$	símbolo $\sigma \in \Sigma$	llegada $\delta(q, \sigma) \in Q$
q_1	A	q_1
q_1	A'	q_2
q_2	A'	q_2
q_2	A''	q_3
q_1	A''	q_4

Representa explícitamente los parámetros y el valor que toma cada ocurrencia de la función de transición. A continuación, se muestra el diagrama del autómata finito.

Sean A y B dos vectores cuyas componentes son los coeficientes de las señales de las ventanas de 256 datos de una señal de sonido. El vector $B = [b_0, b_1, b_2, \dots, b_9]$ es el vector registrado en la base de datos y $A = [a_0, a_1, a_2, \dots, a_9]$ es el vector que se obtiene de la captura de la señal por el micrófono. La figura 3 corresponde al modelo del sistema SCMP representado por un autómata finito de cuatro estados, que se numeran como sigue:

La figura del autómata que se muestra contiene 4 estados y una señal de entrada que corresponde a una ventana de 256 datos de la señal que se analiza y se obtienen 10 coeficientes representativos de su comportamiento que serán comparados con los 10 coeficientes de la base de datos que contiene las señales en estado normal y con las cuales se comparará bajo una tolerancia ϵ_1 cómo se mencionó.

Si el autómata continúa recibiendo ventanas y manteniendo la tolerancia ϵ_1 , el estado del autómata no cambia. Caso contrario hace una transferencia al estado 2 y esta ventana se compara con la base de datos ahora con una tolerancia ϵ_2 . Si esta señal de la ventana se mantiene el autómata sigue en ese estado. Caso contrario hace una transferencia al estado 3 del autómata que se mantiene en ese estado por un periodo de ciclos permitidos para que finalmente si dicha ventana no cumple con la tolerancia

máxima dada por ϵ_3 directamente la transferencia se hace al estado 4 de mantenimiento.

Si el autómata continúa recibiendo ventanas y manteniendo la tolerancia ϵ_1 , el estado del autómata no cambia. Caso contrario hace una transferencia al estado 2 y esta ventana se compara con la base de datos ahora con una tolerancia ϵ_2 . Si esta señal de la ventana se mantiene el autómata sigue en ese estado. Caso contrario hace una transferencia al estado 3 del autómata que se mantiene en ese estado por un periodo de ciclos permitidos para que finalmente si dicha ventana no cumple con la tolerancia máxima dada por ϵ_3 directamente la transferencia se hace al estado 4 de mantenimiento.

Este proceso se sigue para cualquier ventana en cuyo caso si la ventana no pasa la tolerancia desde el principio la transferencia se hará al estado 3 y posteriormente pasará al estado 4 de mantenimiento.

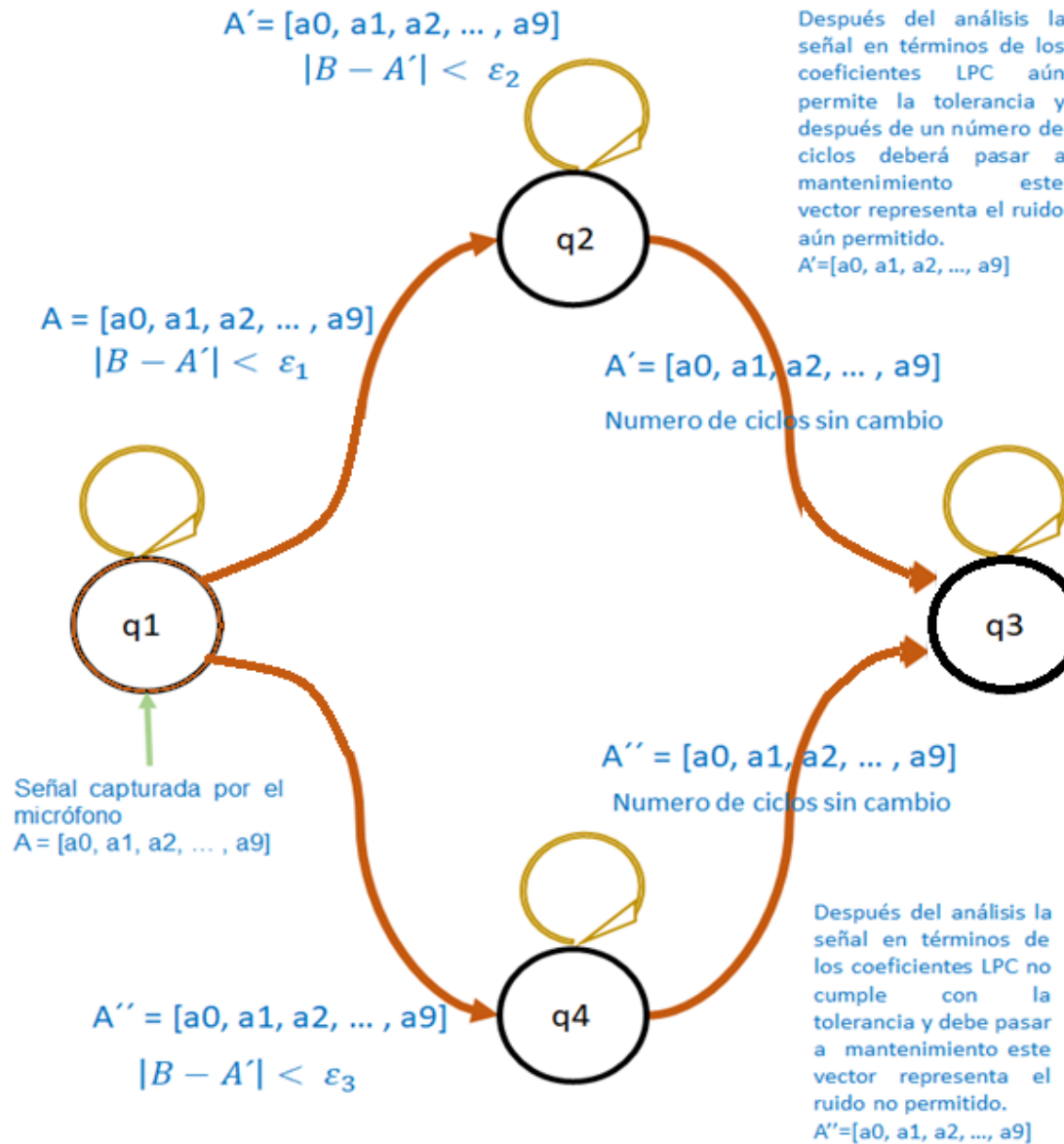


Figura 16: Autómata. Elaboración propia

Capítulo 5

Pruebas y Resultados

En las Figuras 18, 19, y 20, se pueden observar las señales de tres tipos de ruido del funcionamiento de un motor eléctrico. Como se ha mencionado se desarrolló un sistema computacional, PMS (Preventive Maintenance System), el cual consiste en un conjunto de funciones, escritas en lenguaje de programación C, para el procesamiento de señales digitales acústicas. Estas funciones se diseñaron especialmente para realizar una tarea específica: capturar sonido, extracción de parámetros representativos del ruido, comunicaciones TCP/IP, transformadas (Fourier, Laplace, Z, entre otras herramientas matemáticas), entrada/salida grafica.

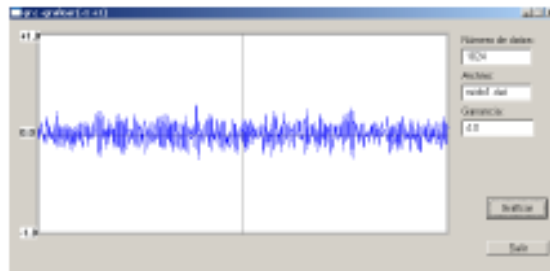


Figura 17: Funcionamiento normal del equipo. Elaboración propia

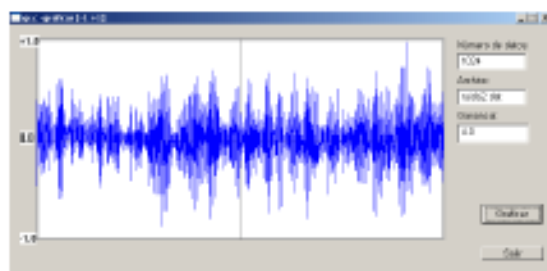


Figura 18: Funcionamiento de un componente a punto de dañarse. Elaboración propia

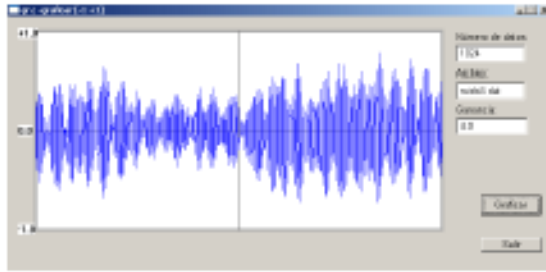


Figura 19: Componente dañado. Elaboración propia

En las tablas 2 y 3 se presentan los valores que corresponden a un segmento de ventana de datos de ruido (ventana superior de la figura 5.2). Estos números corresponden a los coeficientes de reflexión (tabla 1) y los coeficientes de predicción lineal (tabla 2) de un segmento de señal de ruido.

En el laboratorio de acústica del ESIME-IPN, y utilizando el método de Levinson-Durbin se calcularon 10 coeficientes de reflexión y 10 coeficientes de predicción (Meneses Gonzáles, 1989).

Para esto, se programó en lenguaje de programación C, las siguientes funciones correspondientes:

(a) `getfac()`, calcula los valores de autocorrelación de la señal; (b) `getceref()`, calcula los coeficientes de reflexión; (c) `getlpc()`, calcula los coeficientes de predicción. Estas y otras funciones de apoyo son controladas por un programa principal (`test.c`). En la Figura 3.6 se puede ver tres señales: la señal original, el error.

$RC[1] = -0.999814$
$RC[2] = 0.300585$
$RC[3] = 0.394866$
$RC[4] = 0.302412$
$RC[5] = 0.231131$
$RC[6] = 0.395477$
$RC[7] = -0.034947$
$RC[8] = 0.084053$
$RC[9] = 0.121510$
$RC[10] = 0.102158$

Tabla 2: Coeficientes de reflexión para un ruido

$A[1] = 1.000000$
$A[2] = -0.895069$
$A[3] = -0.220949$
$A[4] = -0.012718$
$A[5] = -0.030027$
$A[6] = -0.178566$
$A[7] = 0.393647$
$A[8] = -0.136563$
$A[9] = -0.049742$
$A[10] = 0.028803$

Tabla 3: Coeficientes LPC para un ruido

producido al calcular los coeficientes, y la señal de salida la cual se recupera utilizando un filtro cuyos parámetros son los coeficientes de predicción lineal. Por otro lado, en la tabla 1 se muestran los coeficientes de reflexión obtenidos, y en la tabla 2 se muestran los coeficientes de predicción que se obtuvieron a partir de una fuente de señal ruidosa producida por un motor de inducción. Utilizando una aplicación externa (r_rt_lpc) se puede apreciar en la Figura 7 un tubo el cual corresponde a la susodicha señal ruidosa. Finalmente, en el anexo se muestra el código fuente más relevante del sistema computacional.

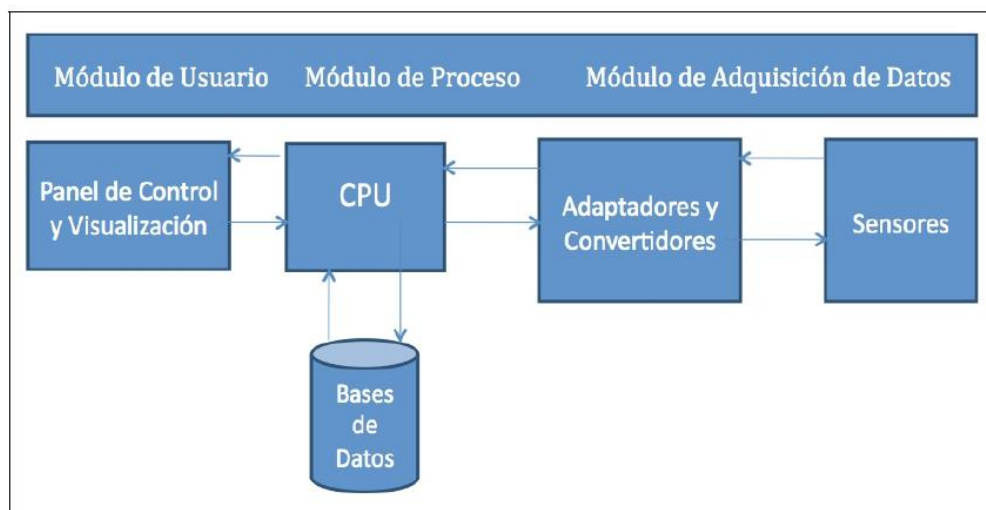


Figura 20: Esquema básico de un sistema de adquisición y control de señales de ruido. Elaboración propia

5.1. Comparación de resultados

Con la finalidad de hacer una comparación de resultados con sistemas de mantenimiento preventivo, que utilizaran el ruido de los componentes de equipos electromecánicos como base para detectar alguna falla, no se encontró en la literatura sistemas con esta característica, sin embargo, existen paquetes o sistemas para el mantenimiento preventivo que utilizan a través de acelerómetros el comportamiento de vibración de los componentes del equipo, y que por medio de esta señala alguna falla.

Uno de estos sistemas conocido como un sistema de control supervisorio SCADA (Supervisory Control And Data Adquisition) (Wang, Li, & Han, 2017), sin embargo, es posible mencionar que a pesar de no contar con un esquema de señal de algún dispositivo analizarlo y compararlo con ambos, se puede decir que efectúan los mismos análisis, para el tratamiento de la señal, por lo cual se infiere que si se tuvieran los datos numéricos serían similares, esto se debe a que en ambos sistemas se utilizan los mismos métodos matemáticos para el tratamiento de la señal. La diferencia principal es que en SCADA se utilizan acelerómetro y sensores, los cuales deben estar en contacto con la superficie de los componentes del equipo en cuestión.

Se debe mencionar que el sistema SCADA es un sistema muy completo y que lo describiré a grandes rasgos, para tener una idea del potencial de SCADA, que es un software de alta calidad y que entre los muchos detalles con los que cuenta es la visualización de la señal y el control de los dispositivos y los reportes que emite de acuerdo al usuario.

A continuación, se describe a grandes rasgos el sistema SCADA, hay mucha información al respecto, pero debo adelantar que los sistemas SCADA, no utilizan el ruido de los componentes de un sistema electromecánico para detectar la falla y en general para cualquier sistema. Es muy importante este punto debido a que hay situaciones de equipos o lugares inaccesibles o peligrosos en donde se puede aprovechar el sistema MPS que en esta tesis se propone.

5.1.1. Sistema SCADA

El Sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), es un sistema de adquisición de datos y control supervisorio. El sistema SCADA es un sistema computacional diseñado para sistemas de producción, en donde la adquisición de datos y la comunicación con los dispositivos de campo controlan el proceso en forma automática desde la computadora a través de controladores autónomos, autómatas programables, etc. Además, proporciona la información que se genera en el proceso productivo a diversos usuarios. Entonces, también SCADA es un sistema de control, que sirve para monitorear o supervisar tareas que se realizan en la fabricación y hace una interfaz entre los niveles de control y de gestión.

Realmente el sistema SCADA se instala con el objetivo de aprovechar los siguientes elementos: Funcionalidad y visualización completa con arquitectura abierta que permita combinaciones con aplicaciones estándar y de usuario, permite la integración con las herramientas ofimáticas y de producción. Fácilmente configurable y escalable, es independiente del sector y la tecnología, tiene funciones de mando y supervisiones integradas, las comunicaciones son flexibles, fáciles y transparentes al usuario, con el equipo de planta y el resto de la empresa.

5.1.2. Objetivos de los Sistemas SCADA

Los sistemas SCADA se conciben principalmente como una herramienta de supervisión y mando, los objetivos son: Economía, Accesibilidad, Mantenimiento, Ergonomía, Gestión, Flexibilidad, Conectividad.

La IEEE define como sistema abierto todo aquel que proporciona los medios para poder funcionar correctamente con otros sistemas que operen bajo las mismas especificaciones que éste, siendo estas especificaciones de dominio público.

Todos los sistemas, de mayor o menor complejidad, orientados a lo anteriormente dicho, aparecen bajo uno de los nombres más habituales para definir esta relación: Interfaz Hombre-Maquina, o bien Interface Humano-Maquina. El sistema a controlar

aparece ante el usuario bajo un numero de pantallas cierta cantidad de información. Por ejemplo, de planos, fotografías, esquemas eléctricos, gráficos de tendencias, etc.

5.1.3. Asistencias

El sistema SCADA, en su interface hombre-maquina, comprende toda una serie de funciones y utilidades encaminadas a establecer una comunicación lo más clara posible entre el proceso y el operador, las asistencias de una herramienta de este tipo destacan: (a) La monitorización, representación de datos en tiempo real a los operadores de planta. Hoy en día la mayoría de los sistemas SCADA ofrecen bibliotecas de funciones y objetos gráficos que permiten personalizar de manera muy amplia la aplicación que desee realizar con dicho sistema SCADA. (b) La Supervisión, mando y adquisición de datos de un proceso y herramientas de gestión para la toma de decisiones (mantenimiento predictivo, por ejemplo).

Tienen además la capacidad de ejecutar programas que puedan supervisar y modificar el control establecido, bajo ciertas condiciones, anular o modificar tareas asociadas a los autómatas. Evita una continua supervisión humana. (c) La adquisición de datos de los procesos en observación.

La visualización de los estados de las señales del sistema (alarmas y eventos). reconocimiento de eventos excepcionales acaecidos en la planta y su inmediata puesta en conocimiento a los operarios para efectuar las acciones correctoras pertinentes. Además, los paneles de alarma pueden exigir alguna acción de reconocimiento por parte del operario, de forma que queden registradas las incidencias. (d) El mando. Posibilidad de que los operadores puedan cambiar consignas u otros datos claves del proceso directamente desde la computadora. (e) Grabación de acciones o recetas. En algunos procesos se utilizan combinaciones de variables que son siempre las mismas. Un sistema de recetas permite configurar toda una planta de producción ejecutando un solo comando. (f) Garantizar la seguridad de los datos. Tanto el envío como la recepción de datos deben de estar suficientemente protegidos de influencias no deseadas, intencionadas o no. (g) Garantizar la seguridad en los accesos. Restringiendo zonas de programa comprometidas a usuarios no autorizados, registrando todos los accesos y acciones llevadas a cabo por cualquier operador. (h) Posibilidad de programación numérica. Permite realizar cálculos matemáticos utilizando el CPU de la computadora.

5.1.4. Ventajas

Cuando se habla de un sistema SCADA no hay que olvidar que hay algo más que las pantallas que nos informan de cómo van las cosas en nuestra instalación. Tras éstas se encuentran multitud de elementos de regulación y control, sistemas de comunicaciones y múltiples utilidades de software que pretenden que el sistema funcione de forma eficiente y segura. Las ventajas más evidentes de los sistemas de control automatizado y supervisado (SCADA) se pueden enumerar como sigue: El nivel de desarrollo de los paquetes de visualización permite la creación de aplicaciones funcionales sin necesidad de ser un experto en la materia. Un sistema PLC está concebido para trabajar en condiciones adversas, proporcionando robustez y fiabilidad al sistema que controla. El modularidad de los autómatas permite adaptarlos a las necesidades actuales y ampliarlos posteriormente si es necesario.

Cualquier tipo de sensores y actuadores puede integrarse en un programa de PLC mediante las múltiples tarjetas de adquisición disponibles. Gracias a las herramientas de diagnóstico se consigue una localización más rápida de errores. Esto permite minimizar los periodos de paro en las instalaciones y repercute en la reducción de costos de mantenimiento. Un sistema de control remoto puede definirse de manera que pueda funcionar de forma autónoma, aún sin comunicaciones con la estación maestra.

El concepto de tele mantenimiento permite realizar modificaciones de software en las estaciones remotas desde el centro de control. Los programas de control pueden documentarse convenientemente de manera que puedan ser fácilmente interpretados por los técnicos de mantenimiento. Un conjunto de manuales de usuario y documentación técnica adecuados permitirán el manejo satisfactorio por terceras personas. Los sistemas de diagnóstico implementados en los elementos de control informan continuamente de cualquier incidencia en los equipos. Los programas de visualización pueden presentar todo tipo de ayuda al usuario, desde la aparición de una alarma hasta la localización de la causa o la parte de esquema eléctrico implicada en la misma. Esto permite reducir los

tiempos de localización de averías al proporcionarse información sobre el origen y las causas de los fallos.

La generación y distribución automática de documentación. El sistema de visualización puede recoger los datos del autómatas y presentarlos en formatos fácilmente exportables a otras aplicaciones de uso común, tales como hojas de cálculo. Haciendo uso de las tecnologías celulares (GSM, GPRS, UMTS), los sistemas de control pueden mantener informados sobre cualquier incidencia a los operadores responsables de los mismos mediante mensajes de correo electrónico o de voz.

La integración de sistemas es rápida gracias a los sistemas de comunicación estandarizados. La tecnología Web permite el acceso desde cualquier punto geográfico al sistema de control. Los protocolos de seguridad permiten una gestión segura y eficiente de los datos, limitando el acceso a personas no autorizadas.

Aumento de calidad del producto mediante las herramientas de diagnóstico. El operador es notificado en el momento en que se detecta una incidencia.

La reducción de personal permite menor número de equipos de mantenimiento, más reducidos y mejor coordinados gracias a la información proveniente de las estaciones remotas, evaluada en el centro de control. Posibilidad de mantenimiento por parte de suministradores locales de servicios. El nivel de descentralización va en aumento, apostando por la modularidad. Esto permite una mayor disponibilidad, pues las funciones de control se pueden repartir y/o duplicar. La distribución de recursos y control sobre la red permite una mejor coordinación entre las estaciones remotas en caso de fallos en una de ellas. Mediante las redes de comunicación, el sistema SCADA se integra en la red corporativa, permite la integración entre los niveles de Campo y Gestión y completa así se tiene una estructura CIM (Computer Integrated Manufacturing).

5.1.5. El entorno

La automatización de sistemas, desde el estado inicial de aislamiento productivo, ha pasado a formar parte del ámbito corporativo y se engloba dentro del paquete empresarial con la finalidad de optimizar la productividad y mejorar la calidad. El esquema que representa los flujos de información dentro de la empresa y representa cómo

se realiza la integración a todos los niveles es similar a la conocida pirámide de la automatización CIM.

La estructura corporativa está dividida en tres niveles, que engloban las funciones principales que se desarrollan en cada uno de ellos: ERP (Enterprise Resource Planning) o Planificación de Recursos Empresariales: engloba la parte de gestión: finanzas, compras, ventas, logística. MES (Manufacturing Execution System) o Gestión de la Producción: comprende la gestión de calidad, documentación, gestión de producción, mantenimiento y optimización. CONTROL: engloba toda la parte de automatización y control de procesos.

Estos niveles engloban los diferentes flujos de información que se dan entre los elementos de cada uno de ellos (comunicación horizontal) y el intercambio de información que se da entre los diferentes niveles (comunicación vertical).

La finalidad de este organigrama es disponer de la máxima información posible sobre el estado operativo global de la empresa para planificar las acciones de producción: Conocer la demanda prevista para planificar la producción a corto, medio y largo plazo, y coordinar compras y logística (ERP). Conocer las existencias de material disponibles para aplicar en el proceso productivo y decidir si hay que planificar nuevas compras (MES) es decir la Gestión del Almacén. Coordinar los ciclos de Mantenimiento Preventivo para conocer la disponibilidad de maquinaria y la capacidad operativa durante el tiempo de producción previsto (MES) Mantenimiento. Conocer el estado operativo de planta (CONTROL) vía SCADA. En el caso de relación con el exterior (proveedores de producto necesario para el desarrollo del proceso) la comunicación se extiende hacia fuera SCM, (Supply Chain Management) Gestión de Suministros.

Este concepto es viable gracias a la aplicación generalizada de los principios de estandarización y escalabilidad a todos los niveles. Los tres niveles no tienen límites claramente definidos. Las herramientas ERP van asimilando capacidades propias del nivel MES de la misma manera que las aplicaciones de Control (SCADA) van adquiriendo prestaciones del nivel superior (MES) al disponer de herramientas de comunicación con bases de datos y con aplicaciones internas y externas.

5.1.6. Criterios de selección y diseño

Desde la invención de los primeros automatismos, los sistemas de control han ido creciendo en complejidad y han invadido todos los campos. Han pasado a ser una parte integrante de nuestras vidas y sólo nos apercibimos de su verdadera magnitud cuando éstos dejan de funcionar correctamente debido a un mal diseño o a situaciones imprevistas. Un sistema de control cualquiera es útil, evidentemente, mientras funcione correctamente.

La reacción de un sistema ante situaciones inesperadas de terminará su grado de fiabilidad. Los parámetros que influyen en las posibilidades de supervivencia se pueden englobar bajo los siguientes denominadores:

Disponibilidad. Por disponibilidad de un sistema informático se entiende la medida en la que sus parámetros de funcionamiento se mantienen dentro de las especificaciones de diseño. Se basará en dos pilares fundamentales: hardware y software.

Robustez. Ante un fallo de diseño, un accidente o una intrusión, un sistema eficiente debe de poder mantener un nivel de operatividad suficiente como para mantener unos mínimos de servicio.

Seguridad. Un fallo en el diseño, un usuario malintencionado o una situación imprevista podrían alterar los parámetros de funcionamiento de un sistema, el sistema debe permitir establecer estrategias para prevenir, detectar y defenderse de acciones no deseadas. **Prestaciones.** Básicamente se refieren al tiempo de respuesta del sistema. Durante el desarrollo normal del proceso la carga de trabajo de los equipos y el personal se considera que es mínima y está dentro de los parámetros que determinan el tiempo real de un sistema. **Mantenibilidad.** Los tiempos de mantenimiento pueden reducirse al mínimo si el sistema está provisto de unas buenas herramientas de diagnóstico que permitan realizar tareas de mantenimiento preventivo, modificaciones y pruebas de forma simultánea al funcionamiento normal del sistema.

Escalabilidad. Este concepto está básicamente relacionado con la posibilidad de ampliar el sistema con nuevas herramientas o prestaciones y los requerimientos de tiempo necesarios para implementar estas ampliaciones.

5.1.7. Arquitectura de un sistema SCADA

El desarrollo de las computadoras personales ha permitido su implantación en todos los campos del conocimiento y a todos los niveles imaginables. Las primeras incursiones en el campo de la automatización localizaban todo el control en la computadora personal y tendrían progresivamente a la distribución del control en planta.

De esta manera, el sistema queda dividido en tres bloques principales: Software de adquisición de datos y control (SCADA); Sistemas de adquisición y mando (sensores y actuadores); y el Sistema de interconexión (comunicaciones).

El usuario, mediante herramientas de visualización y control, tiene acceso al Sistema de Control de Proceso, generalmente una computadora donde reside la aplicación de control y supervisión. La comunicación entre estos dos sistemas se suele realizar a través de redes de comunicaciones corporativas. El Sistema de Proceso capta el estado del Sistema a través de los elementos sensores e informa al usuario a través de las herramientas HMI. Basándose en los comandos ejecutados por el Usuario, el Sistema de Proceso inicia las acciones pertinentes para mantener el control del Sistema a través de los elementos actuadores. La transmisión de los datos entre el Sistema de Proceso y los elementos de campo se lleva a cabo mediante los denominados buses de campo. La tendencia actual es englobar los sistemas de comunicación en una base común. Toda la información generada durante la ejecución de las tareas de supervisión y control se almacena para disponer de los datos a posteriori. Mediante el software de adquisición de datos y control, el mundo de las maquinas se integra directamente en la red empresarial, pasando a formar parte de los elementos que permitirán crear estrategias de empresa globales.

Aparece el concepto de Fabricación Integral Informatizada (Computer Integrated Manufacturing). Un sistema SCADA es una aplicación de software especialmente diseñada para funcionar sobre computadoras en el control de producción que proporciona comunicación entre los dispositivos de campo, donde se pueden encontrar elementos tales como controladores autónomos o autómatas programables, y un centro de control o Unidad Central, donde se controla el proceso de forma automática desde la pantalla de uno o de varias computadoras.

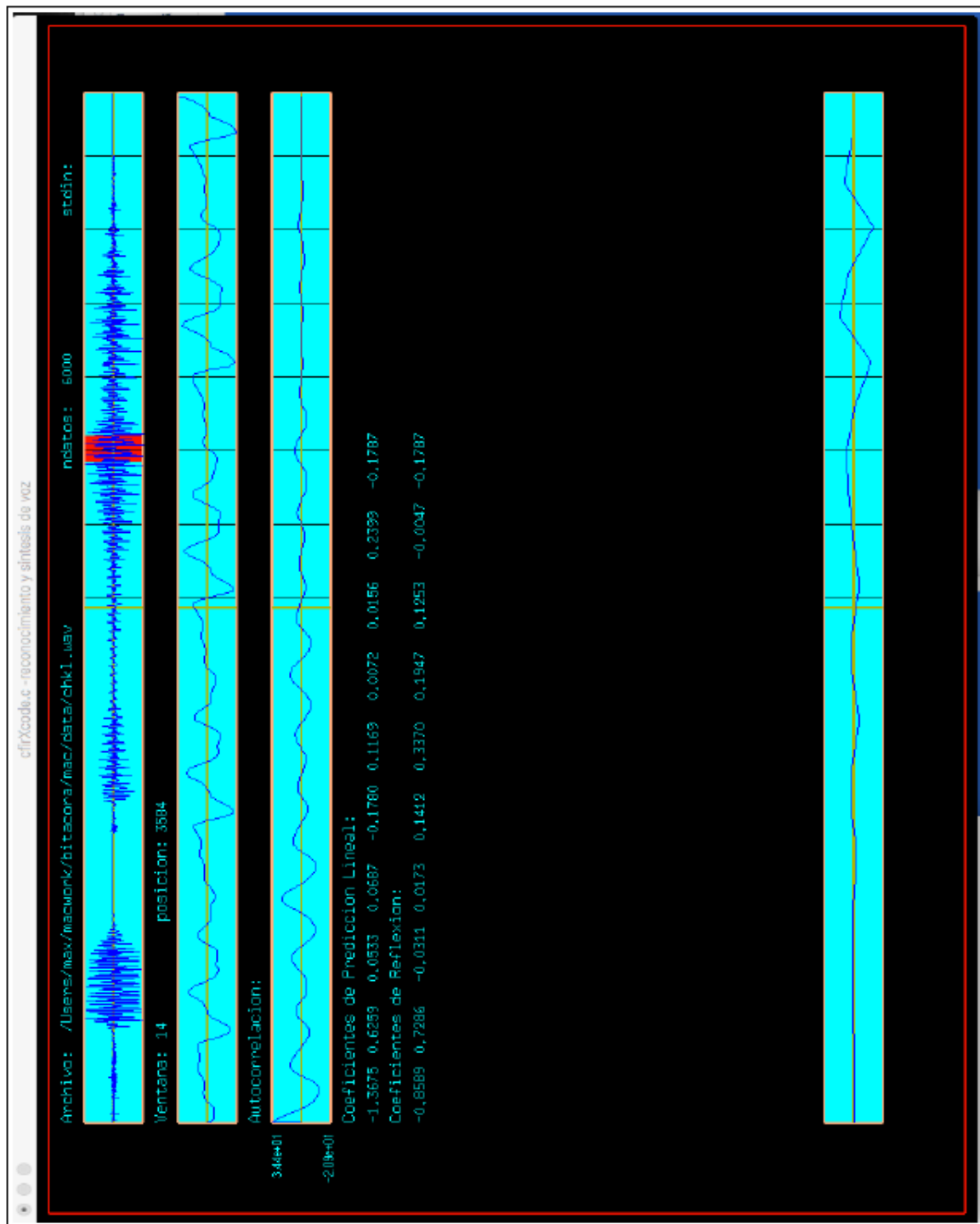


Figura 21: Obtención de los coeficientes LPC de un ruido como el de la voz. Elaboración propia

Conclusiones y Trabajos Futuros

Se encontró que la técnica propuesta como alternativa para mantenimiento preventivo de equipos industriales electromecánicos utilizando el ruido de los componentes del equipo cuando está en operación fue razonablemente buena. Esta alternativa para el mantenimiento preventivo puede elucidar por medio del ruido las fallas de los componentes del equipo en operación. Está propuesta de detección de fallas usando el ruido, condujo a la elaboración de estudios sobre señales, principalmente el conocimiento del diseño digital de señales, con la idea de capturar la señal de ruido y tratarla, con el fin de obtener información sobre ella, principalmente lo relacionado con la frecuencia de vibración del componente. Se sabía que el ruido nos daba información sobre la razón de vibración, además se conocían programas y sistemas que obtenían la misma información a partir de la vibración excepto que no utilizan el ruido con fuente de la falla, sino la vibración del componente a través de dispositivos como acelerómetros, sensores entre otros, entonces, se pensó que la vibración producía un ruido y que este se podría capturar y tratar como una señal de vibración, por lo que se aboco a capturar la señal con un micrófono y hacer el tratamiento de la señal como los demás sistemas, así que se elaboró un sistema computacional, que pudiera analizar la señal a tiempo real. Es decir, al momento en que se producía el ruido, en este punto, tomando en cuenta que el micrófono de la computadora estuviese abierto y sólo se registrara la señal en periodos de tiempo que el operador considere pertinente.

Se hicieron pruebas y se tomó como ejemplo el ruido de un motor eléctrico como se ha mostrado en los resultados, dejando constancia que el análisis de la señal era correcto (Figuras 18, 19, y 20). Por lo que respecta a la información vía texto de la señal, considero que se continuará para trabajos futuros, no exactamente como un informe de la falla que se hace en los sistemas como SCADA, sino solamente identificación del componente, diagnóstico de la falla y su ubicación, probablemente también las consecuencias. Es conveniente mencionar que lo más relevante de esta propuesta es obtener información del ruido de componentes de los equipos que se encuentran en lugares inaccesibles o en zonas de trabajo peligrosas. Finalmente debo mencionar que

este proyecto de tesis me abrió el panorama en muchos aspectos, principalmente en lo que se refiere a tecnologías emergentes en el área de la acústica, por ejemplo, la utilización de los micrófonos inteligentes. Es preciso mencionar que actualmente se utilizan tecnologías de red TCP/IP para interconectar micrófonos que ya involucran un procesador y un sistema operativo en tiempo real, que puede conformar una red inalámbrica en diferentes puntos de los sistemas electromecánicos como el que utiliza el protocolo DANTE en grabación de audio.

Apéndice

Apéndice A

Codigo Fuente

A.1. Cálculo de los coeficientes de autocorrelación

```
#include <stdio.h>
#include <malloc.h>
#include <math.h>

static double *ac;

double *getfac( int n,double const *x, int lag)
{
    double d;
    int i,j;
    int N=1;
    int retraso;
    ac = (double *)malloc(n*sizeof(double));
    retraso=lag-1;

    for(j=0;j<lag;j++)
    {
        d=0;
        for (i=retraso; i<n; i++)
        {
            d = d+(x[i] * x[i-retraso]);
            ac[retraso] = d;
        }
        ac[retraso]=ac[retraso]; // biased
        N++;
        retraso--;
    }
    return(ac);
}
```

A.2. Cálculo de los coeficientes de reflexión

```
#include <stdio.h>
#include <malloc.h>
```

```

#include <math.h>

# define P_MAX 10

static double *ref;

double *getfcref (double const *ac)
{
    int i, j;
    double r;
    double error=ac[0];
    double tmp;
    double lpc[10];

    ref = (double *)malloc(P_MAX*sizeof(double));

    if (ac[0] == 0)
    {
        for (i=0; i<P_MAX; i++) ref[i]=0;
        return 0;
    }

    for (i=0; i<P_MAX; i++)
    {
        // Sumar los coeficientes de reflexion.
        r = (-ac[i+1]);
        for (j = 0; j<i; j++) r=r-(lpc[j] * ac[i-j]);
        ref[i] = r/(r/error);
        // actualizar coeficientes LPC y el error total.
        lpc[i]=r;

        for (j=0; j<i/2; j++)
        {
            tmp = lpc[j];
            lpc[j] = lpc[j] + (r * lpc[i-1-j]);
            lpc[i-1-j] = lpc[i-1-j] + (r * tmp);
        }

        if (i % 2) lpc[j] = lpc[j]+(lpc[j] * r);
        error = error * (1.0 - pow(r,2));
    }
    return(ref);
}

```

A.3. Programa de control (Version MacOSX)

```

//-----
// cfirXcode.h -encabezado para cfirXcode.c
//-----
//

```

```

#define ANCHO 1200 // ventana
#define ALTO 800 // ventana

# define XWIN 600
# define YWIN 100

# define XMAX 1200
# define YMAX 800

# define XGR 0 // margen X
# define YGR 0 // margen Y

# define VSP60 60
# define HSP100 100

# define NEGRO 0
# define BLANCO 1
# define ROJO 2
# define VERDE 3
# define AZUL 4
# define GRIS 5

# define PATHFILE "/Users/max/macwork/bitacora/mac/data/"
# define NAMEFILE "chkl.wav"
# define TVEN 256
# define MAXCHAR 80

void kmain(void);
void kinitgl(int, char **,char *,int,int,int,int, int);
void kcolor(int);
void grueso(GLint);
void setrec(GLint, GLint, GLint, GLint);
void fillrec(GLint, GLint, GLint, GLint, GLint);
void fillcur(double, double, double, double, int);
void setpixel(GLint, GLint);

void grstr(GLfloat, GLfloat, char *);
void grint(GLfloat, GLfloat, int);
void greal(GLfloat, GLfloat, float);
void grnum(GLfloat, GLfloat, char *, float);
void grnxp(GLfloat x, GLfloat y, GLint z, double n);
void teclado1(unsigned char,int, int);
void teclado2(GLint, GLint, GLint);
void grerror(GLfloat, GLfloat, char *);

int grvec (double,double,double,double,double,double *);
int grvecs(double,double,double,double,double,double *,double);
int vspace(int, int);
int hspace(int, int);

double nwavdata(char *);
double *loadwav (char *);
double *getfac( int ,double const *, int);

```

```

double *getflpc(double *);
double *getfceref(double *);
double *gtmaxmin(double,double *);
double *gtvnorm(double,double *);
double *gtvcpy(double,double *);
double *gtfpb5k(double, double *);
double *getham(double, double *);
double *krapido(double, double *);
double *kdiez(double, double *);
double *kgtpth(double *);

double *vcpy;
double *vdumy;
double *vec;
double *vecf;
double *vac;
double *vlpc;
double *vceref;
double *vnorm;
double *sal;
double *vmaxmin;
double *khm;
double *kr;
double *kdz;
double *kpth;

double ndatos;
double perro;
double lpc[20];
double vec1pc[TVEN+1];

char scabeza[20];
char scola[20];
char schar[20];
char namefile[20] = NAMEFILE;
char pathfile[80] = PATHFILE;
char fname[MAXCHAR];

char colaCircular[MAXCHAR];
char sdatain[MAXCHAR];

int cola = 1;
int cabeza = 1;
int maxchar = MAXCHAR;

int idx=0;

int n,i,x,y;
int xmax;
int offset=0;
int nesc=1;
int delta;
int idx;
int curX = 0;

```

```

int indice = 0;
int cursorX = 0;
int tven = TVEN;

int creturn=1;

double ancho  = XMAX-(2*XGR);
double alto   = YMAX-(2*YGR);

double *sal;
double *vmaxmin;

double ndatos;
double perro;
double lpc[20];
double vec1pc[TVEN+1];

//-----
//  main.c
//  cfirXcode
//
//-----
//
# include <GLUT/glut.h>
# include <stdio.h>
# include <stdlib.h>
# include <string.h>
# include <math.h>
# include "cfirXcode.h"

# define QUEHACE  "cfirXcode.c -reconocimiento de señales"

void kmain(void)
{
    glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
    grueso(2);
    glColor3f(1.0f,0.0f,0.0f);
    setrec(XGR+10,YGR+10,XMAX-20,YMAX-20);

    if (creturn==1)
    {
        vdumy = loadwav(fname);

        if (vdumy==NULL)
        {
            grerror(XGR+900,YMAX-30,"error: loadwav()");
            free(vdumy);
            creturn=0;
        }
        else
        {
            ndatos=0;
            free(vec);

```

```

        free(vecf);
        vecf = loadwav(fname);
        ndatos = nwavdata(fname);
        vec = gtftp5k(ndatos,vecf);
        creturn=0;
    }
}
x=100;
grstr(XGR+x,YMAX-30,"Archivo:");
grstr(XGR+x+90,YMAX-30,fname);
grstr(XGR+x+650,YMAX-30,"ndatos:");
grint(XGR+x+725,YMAX-30,ndatos);

fillrec(XGR+100,YMAX-90,1024,50,1);
fillcur((XGR+100)+indice*47,YMAX-90,25,50,1);
grvec(XGR+100,YMAX-90,1024,50,ndatos,vec);

vcpy = gtvcpy(TVEN,vec+indice*TVEN);
vac = getfac(TVEN,vcpy,TVEN);
vmaxmin = gtmaxmin(TVEN,vac);
vnorm = gtvnorm(TVEN,vac);

grstr (100,YMAX-110,"Ventana:");
grint(100+60,YMAX-110,indice);
fillrec(100,YMAX-170,1024,50,1);
grvec(100,YMAX-170,1024,50,TVEN,vcpy);

grstr (300,YMAX-110,"posicion:");
grint(300+80,YMAX-110,indice*TVEN);

vlpc = getflpc(vac);
vcref = getfceref(vac);

grstr(100,YMAX-190-80,"Coeficientes de Prediccion Lineal:");
for (i=0;i<10;i++) grnum(100+(i*70),YMAX-210-80,"%2.4f ",vlpc[i]);

grstr(100,YMAX-190-120,"Coeficientes de Reflexion:");
for (i=0;i<10;i++) grnum(100+(i*70),YMAX-210-120,"%2.4f ",vcref[i]);

grnxp(XGR+46,YMAX-128-80,5,vmaxmin[0]);
grnxp(XGR+40,YMAX-172-80,5,vmaxmin[1]);
grstr (100,YMAX-110-80,"Autocorrelacion:");
fillrec(100,YMAX-170-80,1024,50,1);
grvec(100,YMAX-170-80,1024,50,TVEN,vnorm);

grstr(XGR+1000,YMAX-30,"stdin:");
grstr(XGR+1060,YMAX-30,sdatain);

// calcular pitch
khm = getham(TVEN,vcpy);
kr = krapido(TVEN,khm);
kdz = kdiez(TVEN,kr);
kpth = kgtpth(kdz);

```

```

        fillrec(100,80,1024,50,1);
        grvec(100,80,1024,50,23,kdz);

        glFlush();
    }

int main(int argc, char **argv)
{

    strcpy(fname,pathfile);
    strcat(fname,namefile);

    ndatos = nwavdata(fname);
    vecf   = loadwav(fname);
    vec    = gtftp5k(ndatos,vecf);

    kinitgl(argc,argv,QUEHACE,XWIN,YWIN,XMAX,YMAX,NEGRO);
    // free(vec);
    // free(vac);
    // free(vlpc);

    return(0);
}

```

A.4. Programa de control (Versión MS-Win)

```

//-----
// test.c
//-----
//
# define QUEHACE ("cfirlpc() -filtro lpc")
# include <windows.h>
# include <math.h>

# define XWIN 100
# define YWIN 50
# define ANCHOWIN 1000
# define ALTOWIN 700

//# define ARCHIVO "mmm.wav"
//# define ARCHIVO "ggg.wav"
//# define ARCHIVO "sss.wav"
//# define ARCHIVO "aaa.wav"
# define ARCHIVO "trompi6.wav"
//# define ARCHIVO "maxi6.wav"
// define ARCHIVO "ruido2.wav"

# include "miwin.h"

# define ANCHO 800

```



```

# define ALTO 180
# define X 120
# define Y 30
# define TVEN 512

double *getdblw(char *);
double *getfac(int, double const *,int);
double *getflpc(double const *);
double pferror(double const *);
double *geterror(int, double *, double *);
double *getorg(int, double *, double *);
double getndatw(char *);
double ndatos;
double perro;
    int grstr(HWND,int,int,char *);
    int greal(HWND,int,int,double);
    int grint(HWND,int,int,int);
    int grvect(HWND,int,int,int,int,int,double, double *);

double *vec;
double *vac;
double *vlpc;
double lpc[20];
double *verror;
double *sal;
double veclpc[TVEN+1];
int curX=0;
int index=0;

LRESULT CALLBACK WndProc (HWND hwnd, UINT message,
                        WPARAM wParam, LPARAM lParam)
{
    int i;
    switch (message)
    {
    case WM_CREATE:
        ndatos = getndatw(ARCHIVO);
        vec = getdblw(ARCHIVO);
        vac = getfac(TVEN, (vec+curX),TVEN);
        vlpc = getflpc(vac);
        perro = pferror(vac);
        verror=geterror(TVEN,vlpc,vec);
        sal=getorg(TVEN,vlpc,verror);
        break;

    case WM_PAINT:
        grstr(hwnd,5,100,"file:");
        grstr(hwnd,30,100,ARCHIVO);
        grstr(hwnd,5,120,"index:");
        grint(hwnd,50,120,index);
        grstr(hwnd,5,140,"ndatos:");
        grint(hwnd,55,140,(int)ndatos);
        grstr(hwnd,5,160,"curX:");
        grint(hwnd,50,160,curX);
    }
}

```

```

vac    = getfac(TVEN,(vec+curX),TVEN);
vlpc   = getflpc(vac);
perro  = pferror(vac);

lpc[1]=1.0;
lpc[2]=vlpc[0];
lpc[3]=vlpc[1];
lpc[4]=vlpc[2];
lpc[5]=vlpc[3];
lpc[6]=vlpc[4];
lpc[7]=vlpc[5];
lpc[8]=vlpc[6];
lpc[9]=vlpc[7];
lpc[10]=vlpc[8];
lpc[11]=vlpc[9];
lpc[12]=vlpc[10];

grstr(hwnd,10,240,"LPC:");
greal(hwnd,10,260,lpc[1]);
greal(hwnd,10,280,lpc[2]);
greal(hwnd,10,300,lpc[3]);
greal(hwnd,10,320,lpc[4]);
greal(hwnd,10,340,lpc[5]);
greal(hwnd,10,360,lpc[6]);
greal(hwnd,10,380,lpc[7]);
greal(hwnd,10,400,lpc[8]);
greal(hwnd,10,420,lpc[9]);
greal(hwnd,10,440,lpc[10]);
greal(hwnd,10,460,lpc[11]);
greal(hwnd,10,480,lpc[12]);

grstr(hwnd,10,200,"G:");
greal(hwnd,30,200,perro);

        // calcular vector de error
verror=geterror(TVEN,lpc,(vec+curX));
sal=getorg(TVEN,lpc,verror);

grstr(hwnd,500,10,"entrada x:");
grvect(hwnd,X,Y,ANCHO,ALTO,TVEN,(vec+curX));
grstr(hwnd,500,210,"error e:");
grvect(hwnd,X,Y+200,ANCHO,ALTO,TVEN,verror);
grstr(hwnd,500,410,"salida s:");
grvect(hwnd,X,Y+400,ANCHO,ALTO,TVEN,sal);
break;

case WM_KEYDOWN:
    switch(wParam)
    {
        case VK_LEFT:
            if(curX<=0) break;
            curX=curX-TVEN;
            index--;

```

```

        break;
    case VK_RIGHT:
    if(curX>(int)(ndatos-(double)(2*TVEN)))break;
    curX=curX+TVEN;
    index++;
        break;
    }
    // InvalidateRect(hwnd,NULL,FALSE);
    // con FALSE = PostMessage;
    // con TRUE borra toda la window
    PostMessage(hwnd,WM_PAINT,0,0L);
    break;
case WM_TIMER:
    PostMessage(hwnd,WM_PAINT,0,0L);
    break;

    case WM_DESTROY:
    free(vec);
    free(verror);
    free(sal);
    PostQuitMessage(0);
    break;

    }
    return DefWindowProc(hwnd, message, wParam, lParam) ;
}

```

Bibliografía

- Albiol Colomer, A. J., Prades Nebot, J., & Naranjo Ornedo, V. (1999). Tratamiento digital de la señal teoría y aplicaciones. *Universidad Politécnica de Valencia*, 275.
- Adamson, C., & Kevin, Á. (2012). *A Hands-On Guide to Audio Programming for Mac and iOs*. Addison Wesley.
- Ambardar , A. (2002). *Procesamiento de señales analógicas y digitales*. Michigan: Thomson.
- Antoniou, A. (1993). *Digital Filters: Analysis, Design, and Applications*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Ashok, A. (2002). *Procesamiento de señales analógicas y digitales*. Michigan Technological University.
- Bergen, S. W., & Antoniou, A. (2005). Design of No recursive Digital Filters Using the Ultra spherical Window Function. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2005(12), 1910 - 1922.
- Boaz, P. (199). *Digital Signal Processing of Random Signals: Theory Methods*.
- Bosi, M., & Goldberg, R. E. (2003). *Introduction to Digital Audio Coding and Standards*. Boston, Ma: Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Brandenburg, & Bosi, M. (Febrero de 1997). Overview of MPEG audio: Current and future standards for low-bit-rate audio coding. *Journal of the Audio Engineering Society*, 45, 4 - 21.
- Braunl, T. (2008, 2006, 2003). *Embedded Robotics: Mobile Robot Design and Application with Embedded Systems, third edition*. Alemania: Springer.
- Burrus, C. S., & Parks, T. W. (1985). *DFT/FFT and Convolution Algorithms*. Nueva York: John Wiley and Sons, Inc.
- C, P. J., Neil R, E., & Lefevre W, C. (2000). *Neural and Adaptive Systems*. USA: JohnWiley & Sons.
- C. Britton, R. (1993). Featuring C Routines, TAB. En *Digital Filter Designer's Handbook* (pág. 32). Mc. Graw-Hill.
- Campbell Jr., J. P., Tremain, T. E., & Welch, V. C. (1990). The proposed federal standard 1016 4800 bps voice coder: CELP. *Speech Technology*, 58-64.
- Champeney, D. C. (1987). *A Handbook of Fourier Theorems*. EUA: Cambridge University Press.
- Chang Hoon, L. (2007). *An Algorithm for Preventive Maintenance Policy*. IEEE Transactions on Reliability.
- Chassing , R. (1999). *Digital Signal Processing: Laboratory Experiments Using C and the TMS320C31DSK*. USA: John Wiley & Sons.
- Chassing , R. (2002). *DSP Applications Using C and the TMS320C6x DSK*. USA: John Wiley & Sons.
- Childers, ed., D. G. (1978). *Modern Spectrum Analysis*. Nueva York: IEEE Press.
- Chowning, J. M. (1973). The synthesis of complex audio spectra by means of frequency modulation,. *Journal of the Audio Engineering Society*, 21, 526 - 534.
- Collomb, C. (2009). *Linear Prediction and Levinson-Durbin Algorithm*.

- Cooley, J., & Tukey, J. (1965). An algorithm for the machine computation of the complex Fourier series. (M. o. Computation, Ed.) *Mathematics of Computation*, 19, 297 - 301.
- Craig, M., & Ewers, G. (1996). *A simple Approach to Digital Signal*. Texas: Wiley Interscience.
- Dattorro, J. (1988). The implementation of recursive digital filters for high-fidelity audio. *Journal of the Audio Engineering Society*, 851 - 878.
- Deczky, A. G. (1972). Synthesis of Recursive Digital Filters Using the Minimum p-Error Criterion. *IEEE Trans. Audio Electroacoust*, 257 - 263.
- DSP Committe, E. (1979). *Programs for digital signal processing*. New York: IEEE Press.
- Duhamel, P., & Vetterli, M. (Abril de 1990). Fast Fourier transforms: A tutorial review and state of the art,. *Signal Processing*, 19, 259 - 299.
- Durbin, J. (1960). The fitting of the time series models. *Rev. Ins. Int. Stat.*, 28, 233-243.
- E, C. G. (1998). *Signal and Linear System Analysis: with MATLAB*.
- Embree , P., & Danieli, D. (1999). *C++ Algorithms for Digital Signal Processing*. Prentice Hall PTR.
- Engeln-Müllges, G., & Uhlig, F. (1996). En *Numerical Algorithms With C* (pág. 25). New York: Springer-Verlag.
- Engineeri, T. I. (2014). CIRP Encyclopedia of Production Engineering. (CIRP, Ed.) doi: DOI 10.1007/978-3-642-20617-7
- Giannakopoulos, T., & Pikrakis, A. (2014). *Introduction to Audio Analysis: a MATLAB Approach*. Academic Press.
- González Hernández, M. (1990). Sistemas Expertos Múltiples. *Seundo Congreso Iberoamericano de Inteligencia Artificial, Asociaciones de Inteligencia Artificial de Portugal, España y México*. Morelia.
- Hamming, R. W. (1989). *Digital Filters, 3rd. ed*. Dover: Bell Laboratories.
- Hayes , H. (1999). *Theory and Problems of Digital Signal Processing*. USA: Schaum's McGraw-Hill.
- Heideman, M., Johnson, D., & Burrus, C. S. (Ocyubre de 1984). Gauss and the history of the FFT. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1, 14 - 21.
- Hodson, W. K. (2001). *Maynard: Manual del Ingeniero Industrial* (Cuarta ed.). México: McGraw-Hill.
- Ingle Vinay, K., & Proakis, J. G. (2007). *Digital Signal Processing using MATLAB* (Segunda ed.). CENEAGE Learning Bookware Companion Series.
- Jelinek, F. (1997). *Statistical Methods for Speech Recognition*. USA: Massachusets Institute of Technology.
- Kehtarnavaz, N. (2008). *Digital Signal Processing System Desing: LabVIEW - Based Hybrid Programming* (Second ed.). Academic Press.
- L. Juang, R. (1993). *Fundamentals of Speech Recognition*. Prentice Hall.
- Lerch, A. (2012). Applications in Signal Processing and Music Informatics. En *An Introduction to Audio Analysis, 2nd. Edition* (pág. 26). Wiley: IEEE press.
- Les, T. (s.f.). *Analog and Digital Filter Design Using C*. 1996: Prentice Hall.
- Levinson, N. (1947). The Wiener RMS error criterion in filter design and prediction. *J. Math*, 25, 261-278.
- Lie, C. H. (1986). An Algorithm for Preventive Maintenance Policy. *IEEE Transactions on Reliability* 35, no. 1, 71-75.
- Lions, R. G. (2012). *Streamling Digital Signal Processing, 2nd. ed*. Wiley: IEEE press.

- M, E. P., & Kimble, B. (1995). En *Language Algorithms for Digital Signal Processing* (pág. 25). Prentice Hall PTR.
- M., E. P. (1995). *C Algorithms for Real Time DSP*. Prentice Hall PTR.
- Makhoul, J. (Abril de 1975). Linear prediction: A tutorial review. *Proceedings of the IEEE*, 63, 561 - 580.
- Markel, J. D., & Gray, A. H. (1976). *Linear Prediction of Speech*. New York: Springer Verlag.
- Matheus, G., & Pelinovsky, D. (2008). *Numerical Mathematics*. USA: Jones and Bartlett Publishers.
- McClellan, J. H., Schafer, R. W., & Yoder, M. A. (1998). *DSP First: A Multimedia Approach*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Meneses Gonzáles, S. R. (1989). *Sistema de comunicación utilizando codificación lineal predictiva (LPC)*. México: CINVESTAV I.P.N.
- Michel, W. (2009). *Digital Signal Processing: Using MATLAB and Wavelets*. Hingham, Massachusetts: Infinity Science Press LLC.
- Mitra, S. K. (1998). *Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach*. New York: McGraw-Hill.
- Mitra, S. K. (1998). *Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach*. New York: McGraw-Hill.
- Monson, H. H. (1999). *Theory and Problems of Digital Signal Processing*. Schaum's McGraw-Hill.
- Monson, H. H. (1999). *Theory and Problems of Digital Signal Processing of Speech Signals*. Schaum's McGraw-Hill.
- Moradi E, S. M., & Fatemi Ghomi, M. Z. (2010). *Bi-Objective optimization research on integrated fixed time interval preventive maintenance and production for scheduling flexible job-shop problem*. Elsevier Publisher.
- Moradi, E. &. (2011). Bi-objective optimization research on integrated fixed time interval preventive maintenance and production for scheduling flexible job-shop problem. *Expert Syst. Appl*, 7169-7178.
- Narasimhan, S. V. (2008). *Signal Processing: Principles and Implementation*. Alpha Science.
- Nasser, K. (2008). LabVIEW Based Hybrid Programming. En *Digital Signal Processing System Design* (pág. 29). USA: Academic Press.
- Niebel, B. W. (1996). *Ingeniería Industrial: Métodos, Tiempos y Movimientos* (Novena ed.). Bogotá: Alfaomega.
- Oppenheim, A. V., & Schafer, R. W. (1975). *Digital Signal Processing*. Englewood Cliff: Prentice-Hall.
- Otto, S. R., & Denier, J. P. (2005). *An Introduction to Programming and Numerical Methods in MATLAB*. London: Springer.
- P, C. E. (1995). *Digital Filtering: an Introduction*. USA : John Wiley & Sons.
- Painter, T., & Spanias, A. (2000). Perceptual coding of digital audio. *Proceeding of the IEEE*, 88, 451-513.
- Philip, E. H. (2002). *Ingeniería Industrial Y Administración: Una Nueva Perspectiva*. México: CECSA.
- Prando, R. (1996). Manual de gestión de mantenimiento a la medida. Guatemala.
- Proakis, J. G., & G. Manolakis, D. (1998). *Tratamiento digital de señales: Principios, algoritmos y aplicaciones*. Pearson, Prentice Hall.

- Rabiner, L., & Juang, B. H. (1998). *Speech Recognition by Machine*. CRC Press, IEEE Press.
- Rabiner, L. J. (1993). *Fundamentals of Speech Recognition*. Prentice, Hall.
- Rabiner, L. R., & Schafer, R. W. (1978). *Digital Processing of Speech Signals*. Prentice, Hall.
- Rabiner, L. R., McClellan, J. H., & Parks, T. W. (1975). FIR Digital Filter Design Techniques Using Weighted Chebyshev Approximation,. *Proc. IEEE*, 63, 595-610.
- Rodríguez, M., Iglesias, E., Marínez, R., & Muñoz, E. (1984). Alternativas para síntesis de voz. *Mundo Electrónico*(144), 67-79.
- Rodriguez M, E. I., Martinez, R., & Muñoz, E. (Mundo Electrónico). *Alternativas para síntesis de voz*. 1984.
- Rorabaugh C., B. (1993). *Digital Filter Designer's Handbook: Featuring C Routines*. EUA: Mc Graw-Hill.
- Rulph, C. (1999). *Digital Signal Processing: Laboratory Experiments Using C and the TMS320C31 DSK*. USA: John Wiley & Sons.
- Schuler, C., & Mahesh, C. (2005). *Digital Signal Processing: A hands-on approach*. Mc. Graw-Hill.
- Shafer, R. W., & Oppenheim, A. V. (1975). *Digital Signal Processing*. Nj: Prentice Hall.
- Shaharuddin, S., Y. Zomaya, A., & Abu Bakar, S. (2008). *Computing for numerical methods using Visual C++*. Wiley.
- Shaharuddin, S., Zomaya, A. Y., Stephan, A., & Sanugi, B. (2005). *Numerical Simulations and Case Studies using Visual C++.NET*. Wiley & Sons.
- Shaoming, W., & J. Zuo, M. (2010). *Linear and Nonlinear Preventive Maintenance Models*. IEEE Transaction on Reliability.
- Simon, H., & Van Venn, B. (2003). *Signal and Systems, 2nd. ed.* AddisonWiley.
- Smith III, O. (2007). *Introduction to Digital Filters whit AAudio Applications, Center for Computer Research in Music and Acoustics*. Stanford University.
- Smith III, O. (2007). *Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT) with Audio Applications* (Second ed.). W3K.
- Smith, S. W. (1997). *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*.
- T. Nakagawa. (1979). Optimum Policies When Preventive Maintenance is Imperfect. *IEEE Transactions on Reliability*, vol. R-28, no. 4, 331-332.
- Takata, S., & Kimura, F. (2004). Maintenance: changing role in life cycle management. van Houten FJAM.
- Theodoridis, S., & Koutroumbas, K. (2008). *Pattern Recognition*. San Diego, California, USA: Academic Press.
- Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. (2003). *Facilities Planning* (Tercera ed.). Hoboken NJ: Wiley.
- Toshio, N. (2009). *Optimum Policies When Preventive Maintenance is Imperfect*. IEEE Transactions on Reliability.
- Tremain, T. E., & Campbell Jr., J. P. (1990). The proposed federal standard 1016 4800 bps voice coder: CELP. *Speech Technology Magazine*, 58 - 64.
- Umar M., A.-T., Tahir, A., Bekir, S. Y., & Ahmet, Z. S. (2014). *Integrated Maintenance Planning in Manufacturing Systems*. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London: Springer Science+Business Media. doi:10.1007/978-3-319-06290-7

- Unser, M. (1999). Splines: A perfect fit for signal and image processing". *IEEE Signal Processing Magazine*, 16, 22-38.
- Vaughn, R. C. (1993). *Introducción a la Ingeniería Industrial* (Segunda ed.). Barcelona: Reverté.
- Vinay K, I., & G. Proakis, J. (2007). *Digital Signal Processing using MATLAB*, 2nd. ed. CENEAGE Learning Bookware Companion Series.
- W., H. R. (1989). *Digital Filters*. Dover: Bell Laboratories.
- Wang, J., Li, C., & Han, S. (2017). Predictive maintenance based on event-log analysis: A case study. En *IBM Journal of Research and Development* (págs. 121-132). IEEE.
- Weeks, M. (2009). *Digital Signal Processing: Using MATLAB and Wavelets*. Jones and Bartlett.
- Welch, P. D. (1967). The use of fast Fourier transforms for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15, 70-73.
- White, S. (2000). *Digital Signal Processing*. Delmar Thompson Learning.
- Woods, R., McAllister, J., Yi, Y., & Lightbody, G. (2008). *FPGA-based Implementation of Digital Signal Processing*. Addison-Wiley.
- Woods, R., McAllister, J., Ying, Y., & Lightbody, G. (2008). *FPGA-based Implementation of Digital Signal Processing*. United Kingdom: Addison-Wiley.

