



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

“ANÁLISIS DE MEJORAMIENTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN  
PLANTA PAPELERA”

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

ANDRÉS JACOB PEREIRA TAPIA

PROFESOR GUÍA

ALFREDO MUÑOZ RAMOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

HUMBERTO PEÑA MIRALLES

ARIEL VALDENEGRO ESPINOZA

SANTIAGO DE CHILE

JULIO DE 2012

RESUMEN DE MEMORIA  
PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA  
POR: ANDRÉS PEREIRA TAPIA  
FECHA: 10/07/2012  
PROF. GUÍA: ALFREDO MUÑOZ RAMOS

“ANÁLISIS DE MEJORAMIENTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PLANTA PAPELERA”

Reducir costos asociados a un proceso es un tema transversal en la industria. Si bien las razones pueden ser de tipo económica o ambiental, la preocupación por esta materia ha transformado este tema en una directriz a nivel industrial, y gubernamental. En este contexto el concepto de eficiencia energética no es ajeno para nadie y el conocimiento de alternativas para lograr que un proceso sea eficiente energéticamente es cada vez más abundante.

Un enfoque global de eficiencia energética involucra, además de los parámetros de análisis de costos, inversiones y utilidades, una mirada exhaustiva al proceso involucrado, a su entorno, a su puesta en marcha, desarrollo y término, pasando por la gestión de compra, transporte, mantención, etc.

Es en este último concepto que este trabajo tiene sus fundamentos. Partiendo de la base de que en una planta industrial alrededor del 70% del consumo de energía está asociada a motores, de los cuales el 90% corresponde a un tipo específico de ellos que son los motores de inducción. Se aborda el tema de la mantención de estos equipos desde el punto de vista predictivo y se explica y fundamenta por qué el mantenimiento predictivo es ventajoso con respecto al mantenimiento correctivo. Con estos lineamientos se expone una metodología que utiliza el análisis de respuesta en frecuencia de un registro de corriente de estator de los motores para determinar fallas incipientes o ya avanzadas. Esta metodología es conocida por utilizar la transformada de Fourier para obtener el espectro de frecuencias de la señal de corriente.

Paralelamente, se expone una metodología que, también a través del análisis del espectro de frecuencias, esta vez de la envolvente de la señal, mediante la utilización de la transformada de Hilbert, permite una identificación más fácil de las eventuales fallas.

Para mostrar ambas metodologías se tomaron muestras mediante un equipo registrador de señales en la planta papelera de la empresa CMPC, Papeles Cordillera S.A. ubicada en Puente Alto, Chile. Luego de seleccionar adecuadamente las muestras y tabular los resultados, se obtiene el espectro de frecuencias de las señales de corriente mediante las metodologías mostradas y se analizan los resultados.

Se concluye que la metodología de predicción y monitoreo de falla mediante el análisis del espectro de frecuencias de una señal de corriente es efectiva, y que el esquema de aplicación de la transformada de Hilbert proporciona una herramienta que facilita el trabajo haciéndolo simple y preciso.

*...a mi amada esposa Yvonne*

## Agradecimientos

De forma simple pero emotiva, quisiera agradecer a aquellos por quienes siento gratitud al estar terminando este trabajo y esta etapa.

En primer lugar agradezco a mi esposa Ivonne, por ser mi compañera incondicional, y que con su amor, ternura y paciencia ha sido un pilar fundamental durante este tiempo.

A mis queridos papitos María Elíizabeth y Miguel por ser como son, por darme todo su apoyo y estar siempre preocupados de mí. Las herramientas y valores que me han entregado son su legado más grande y siempre serán mi orgullo. Los admiro.

A mis hermanos Abigaíl y Miguel, por estar siempre pendientes, por compartir conmigo y hacer que nuestro hogar tenga tantos recuerdos lindos.

A Carlos y mi sobrino Alex, a mis suegros, a mis cuñados y cuñadas, a mis primos y primas, tíos y tías, sobrinos y sobrinas, que con su cariño siempre hacen de cada momento un recuerdo.

Agradezco de forma especial a mi profesor guía, Don Alfredo Muñoz, por su enorme entrega académica, su paciencia y buena voluntad, por instarme en todo momento a aportar un poco más y recordarme que la rigurosidad es una característica de un profesional.

A Don Humberto Peña por darme la oportunidad de trabajar en una empresa como Papeles Cordillera, con un gran valor humano y un gran grupo de trabajo. Agradezco su buena voluntad y sus consejos, y especialmente por haber apostado en este trabajo.

A Don Miguel Silva por su profesionalismo, por su apoyo fundamental para el desarrollo de la parte experimental de este trabajo y por su siempre buena onda.

Agradezco al Área de Ingeniería y Construcción y al Área de Mantenimiento de Papeles Cordillera, por su acogida, apoyo y soporte.

Mi gratitud a la empresa Papeles Cordillera S.A. por haberme entregado esta oportunidad y por acogerme durante meses.

A la Universidad de Chile y al Departamento de Ingeniería Eléctrica por darme las herramientas académicas y humanas para enfrentar el mundo de la mejor manera y a mis compañeros con los que compartí durante estos años.

Finalmente agradezco a Dios por la vida, la salud, por darme una familia increíble y la oportunidad de dar este gran paso.

*Con Dios está la sabiduría y el poder; Suyo es el consejo y la inteligencia. Job 12:13*

*Sabiduría ante todo; adquiere sabiduría; y sobre todas tus posesiones adquiere inteligencia. Proverbios 4:7*

## Tabla de contenido

1. Introducción .....	9
1.1 Objetivos.....	10
2. Antecedentes: Eficiencia energética, La Planta Papelera.....	11
2.1 El contexto energético chileno.....	11
2.2 Importancia económica de un rendimiento elevado .....	12
2.3 CMPC. Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones. ....	14
2.3.1 Papeles Cordillera S.A. ....	14
2.4 Metodología de desarrollo. ....	16
2.5 Antecedentes de planta. ....	16
2.5.1 Clasificación del Parque Motor.....	16
2.5.2 Descripción del proceso productivo.....	19
2.5.3 Consumos generales en la planta.....	24
2.5.4 Caracterización del sistema eléctrico de Papeles Cordillera. ....	26
3. Confiabilidad y Predicción de fallas .....	28
3.1 Consideraciones Previas .....	28
3.2 Definiciones relacionadas con la confiabilidad de un sistema eléctrico.....	29
3.2.1 Disponibilidad de energía eléctrica de un equipo eléctrico.....	29
3.2.2 Confiabilidad de un equipo eléctrico.....	31
3.1 Diagnóstico de estado de motores y evaluación de alternativas de mantención.....	32
3.2 Análisis Predictivo Utilizando la Distribución de Weibull.....	33
3.3 Análisis Predictivo mediante Análisis de Frecuencia de la Corriente y Transformada de Hilbert....	34
3.3.1 La transformada de Hilbert.....	34
3.3.2 Envoltente de una señal periódica. ....	36
3.3.3 Interpretación de los Espectros de Frecuencia. ....	37
3.4 Conclusiones del capítulo .....	39
4. Análisis Predictivo Utilizando Transformada de Hilbert. ....	40
4.1 Selección de la muestra.....	40
4.2 Toma de datos. ....	40
4.2.1 Equipo utilizado. ....	41
4.3 Aplicación de Transformada de Hilbert y Análisis de Fourier. ....	41
4.4 Conclusiones del capítulo .....	63
5. Análisis Técnico-Económico de reemplazo de motores. ....	64

5.1 Estimación de la eficiencia de los motores de planta.....	64
5.2 Evaluación económica de reemplazo de motores .....	64
5.2.1 Costos de inversión. ....	64
5.2.2 Costos de Operación.....	65
5.2.3 Cálculo de Indicadores de la evaluación. VAN y TIR. ....	67
5.2.4 Resultados de la evaluación económica. ....	67
5.3 Conclusiones del capítulo. ....	68
6. Conclusiones generales .....	69
7. Bibliografía .....	71
8. Anexos.....	73
8.1 Extracto de la base de datos de Motores .....	73
8.2 Extracto de la base de datos de corrientes para los motores de la muestra seleccionada.....	73
8.3 Código en Matlab para Procesar los datos de corrientes. ....	76

## Ilustraciones

Ilustración 2.1. Crecimiento del PIB y Energía eléctrica de 1970 (año base) hasta 2010 .....	12
Ilustración 2.2. Energía activa consumida en papeles cordillera en 2010. ....	15
Ilustración 2.3. Unidades según rango. ....	17
Ilustración 2.4. Potencia instalada según rangos.....	18
Ilustración 2.5. Diagrama de Disgregación y limpieza. ....	21
Ilustración 2.6. Esquema de la etapa de entrada a la máquina y luego el prensado.....	22
Ilustración 2.7. Esquema de secado. ....	23
Ilustración 2.8. Esquema del acabado del papel.....	24
Ilustración 2.9. Diagrama de conexión Maipo-Subestación Cordillera.....	26
Ilustración 2.10. Diagrama de conexión desde la barra principal de la subestación. ....	27
Ilustración 4.1. Equipo registrador de señales. ....	41
Ilustración 4.2. Amplitud corriente para el motor m2 de la muestra.....	42
Ilustración 4.3. Amplitud corriente para el motor m3 de la muestra.....	42
Ilustración 4.4. Amplitud de la corriente vs tiempo para motor m4.....	43
Ilustración 4.5. Respuesta en frecuencia mediante Fourier.....	45
Ilustración 4.6. Respuesta en frecuencia, zoom de la Ilustración 4.5.....	46
Ilustración 4.7. Fourier de la señal de 1600 muestras. ....	47
Ilustración 4.8. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor m2.....	50
Ilustración 4.9. Respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m2. ....	51
Ilustración 4.10. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor m3.....	52
Ilustración 4.11. Respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m3.....	53
Ilustración 4.12. Zoom respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m3.....	53
Ilustración 4.13. Ilustración. Zoom respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m3 .....	54
Ilustración 4.14. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor m4.....	55
Ilustración 4.15. Respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m4.....	55
Ilustración 4.16. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor m5.....	56
Ilustración 4.17. Respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m5. ....	57
Ilustración 4.18. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor m6.....	58
Ilustración 4.19. Respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m6. ....	59
Ilustración 4.20. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor m7.....	60
Ilustración 4.21. Respuesta en frecuencia análisis clásico motor m7 énfasis en bajas frecuencias. ....	60
Ilustración 4.22. Respuesta de frecuencia para la envolvente del motor m7.....	61
Ilustración 4.23. Respuesta en frecuencia análisis clásico motor m8.....	62
Ilustración 4.24. Respuesta en frecuencia envolvente motor m8.....	62

## Tablas

Tabla 2.1. Unidades de motores según rango de potencia y potencia instalada.....	17
Tabla 2.2. Parámetros de operación de la Máquina 20. ....	19
Tabla 2.3. Consumos de planta y fábrica según áreas y equipos. ....	25
Tabla 3.1. Componentes de frecuencia para un motor sano .....	37
Tabla 3.2. Componentes de frecuencia para un motor saturado y excéntrico.....	37
Tabla 3.3. Componentes de frecuencia para un motor con barras cortadas.....	38
Tabla 3.4. Componentes de frecuencia para un motor con falla en rodamientos.....	38
Tabla 3.5. Componentes de frecuencia para detección de corto circuito de espiras en flujo axial.....	38
Tabla 4.1. Muestra de motores que serán sometidos a análisis de frecuencia. ....	41
Tabla 4.2. Variables que caracterizan la señal en tiempo y frecuencia. ....	44
Tabla 4.3. Variables para la respuesta en frecuencia, de una señal de 3200 muestras .....	46
Tabla 4.4. Variables de la señal analizada para resolución de frecuencia de 0,25 Hz.....	47
Tabla 4.5. Parámetros de operación de los motores muestreados.....	48
Tabla 4.6. Frecuencia de falla análisis clásico y de envolvente. ....	49
Tabla 4.7. Frecuencias características de falla análisis clásico y envolvente .....	50
Tabla 5.1. Precios de los motores según eficiencia.....	65
Tabla 5.2. Precios de motores después de montaje. ....	65
Tabla 5.3. Resultados de la evaluación económica de recambio. ....	67



# 1. Introducción

Es de interés en todos los ámbitos de la industria, a cualquier escala y en cualquier rubro, el tema de reducir costos asociados al consumo de energía. Las razones, naturalmente de origen económico, guardan relación en primer lugar con el interés de aumentar la rentabilidad de la empresa y por otra parte, con la responsabilidad que cada empresa tiene con su entorno y el medio ambiente, es decir, el concepto de Responsabilidad Social Empresarial y el compromiso con el medio ambiente reduciendo la Huella de Carbono, juegan un rol fundamental en toda empresa de hoy en día. Ahora, cuando se habla de reducir costos asociados al consumo de energía, no se está hablando solamente de un cálculo de inversiones y utilidades, sino de un análisis transversal que involucre desde la gestión de compra, hasta el equipo final, pasando por instalaciones, transporte, mantención y equipos. Por ejemplo, la reducción de costos asociados al consumo de energía podría verse plasmada en un aumento de la confiabilidad de un proceso productivo o parte de éste.

El trabajo de titulación será desarrollado en la empresa, Papeles Cordillera de CMPC y llevará por título “Análisis del mejoramiento de la eficiencia de una planta papelera”. El objetivo principal del trabajo es reducir los costos asociados al consumo de energía en la planta que opera dentro de las dependencias de la empresa en cuestión, tomando como principal eje de análisis, la reducción de costos asociado al aumento de la confiabilidad de equipos motrices de la planta.

El desarrollo de este trabajo está realizado en el marco de mejorar la eficiencia de una planta papelera de la empresa CMPC, empresa de conformación tipo holding y de carácter privado, fundada en el año 1920, y cuyos rubros principales corresponden al área forestal, de la celulosa y productos de papel.

Papeles Cordillera, filial de CMPC, está ubicada en Puente Alto, Santiago y se dedica al procesamiento y fabricación de distintos productos de papel y cartón.

Su consumo de energía eléctrica durante el periodo de 2010 fue de 27,636 GWh y sólo por concepto de máquinas asociadas al procesamiento del papel el consumo fue de 15,869 GWh, es decir más del 50%, sin exclusión de que la gran mayoría del resto de los procesos también involucra la utilización de máquinas eléctricas.

## 1.1 Objetivos

En este trabajo el objetivo primario es reducir los costos asociados al consumo energético de una planta papelera. Tomando en cuenta lo anterior, se pueden plantear los siguientes objetivos principales de este trabajo:

- Evaluar el mejoramiento de la eficiencia planta papelera en su totalidad.
- Estudiar el parque de motores de la planta y evaluar distintas alternativas de mejoramiento de eficiencia.

Subyacen a los objetivos planteados, los siguientes objetivos secundarios:

- Evaluar el mejoramiento de la eficiencia del parque de motores de la planta.
- Diseñar o adaptar un modelo de evaluación de eficiencia tanto teórico como práctico para implementarlo en la planta.
- Diseñar o adaptar un modelo de predicción de fallas de motores.
- Estudiar y evaluar la sustitución de motores por sus alternativas con mejor eficiencia.

## 2. Antecedentes: Eficiencia energética, La Planta Papelera.

En relación a la energía, son varios los factores que conviene estudiar, al momento de enfrentar un tema relacionado con la eficiencia. No es casualidad que este tema haya tomado tanta importancia en el último tiempo como tampoco es casualidad que los gobiernos estén estudiando nuevas políticas energéticas. En el ámbito industrial, las demandas de energía están supeditadas a lo que ocurre en el aspecto global de los mercados, especialmente con la inserción de economías emergentes que han fijado nuevos lineamientos en el escenario energético mundial.

En las últimas décadas, dados los avances sostenidos en materia de producción de bienes y servicios, el tema del consumo eficiente de energía se ha transformado en un asunto de gran importancia. Los gobiernos y las empresas han internalizado y puesto en marcha el concepto de la sustentabilidad en sus proyectos, como asimismo cada vez se pone mayor énfasis en materia de seguridad y estabilidad de los sistemas.

Chile particularmente no ha estado ajeno a este tipo de políticas e implementación de nuevas posturas en torno a la eficiencia energética.

Hay diferentes razones por las que las preocupaciones en torno al uso eficiente de energía toman sustento;

- Las reservas de fuentes básicas de energía tienen fecha límite, hay cierto consenso con respecto a las estimaciones de las reservas de carbón y petróleo que son hoy por hoy las principales fuentes de energía no renovable.
- Surgimiento de economías emergentes, algunas de ellas con características continentales como China e India que han acelerado el crecimiento de la demanda energética a nivel global.
- La evidente necesidad ambiental de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y en general gases contaminantes a la atmósfera.

### 2.1 El contexto energético chileno.

No es un hecho desconocido que Chile, particularmente en las últimas dos décadas, ha experimentado un desarrollo en todas las áreas del mercado, lo que ha traído como consecuencia natural un aumento sostenido del consumo energético nacional. Sin embargo, la institucionalidad chilena ha conseguido, mediante la instauración de políticas energéticas tendientes a la disminución del consumo y al aumento de la eficiencia, que haya un desacople entre el índice de crecimiento energético con el crecimiento del PIB<sup>1</sup>, sin embargo, este hecho deja de producirse si se toma en cuenta sólo el índice crecimiento de la energía eléctrica, en cuyo caso hay una clara tendencia de crecimiento mayor que el PIB como se muestra en la Ilustración 2.1.

---

<sup>1</sup> Marcelo Tokman, El futuro energético de Chile, CNE 2009.

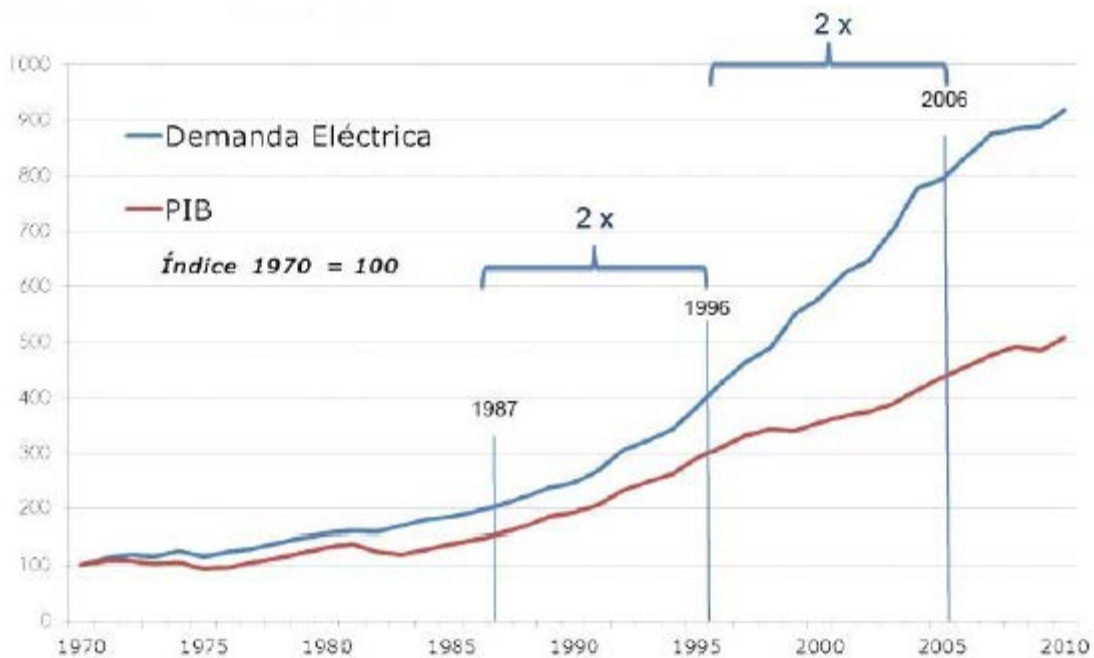


Ilustración 2.1. Crecimiento del PIB y Energía eléctrica de 1970 (año base) hasta 2010

La oferta de energía eléctrica en Chile para el año 2007 alcanzó los 301381 GWh. Dicha oferta es cubierta por cinco fuentes fundamentales de energía que son: petróleo crudo, gas natural, carbón, hidroelectricidad, leña y otros recursos. Los consumos distribuidos por actividad económica son: 37 % sector minero, 31 % sector industrial, 17% sector residencial y 14 % sector comercial y público.

#### Proyecciones de Generación y Consumos

Del consumo total asociado a la industria, del orden del 70 % está asociado a la utilización de motores, de los cuales, la mayoría corresponde a motores de jaula de ardilla<sup>2</sup>. Se hace mención a este hecho porque precisamente los motores de la planta a la que se dedica este trabajo son de inducción jaula de ardilla en su totalidad.

Bajo estas condiciones y antecedentes, es claro que un trabajo sobre la eficiencia de dichos motores es de vital importancia para el desarrollo de una industria sustentable que emplee tecnología más eficiente y optimice el consumo de energía.

## 2.2 Importancia económica de un rendimiento elevado

El concepto de rendimiento está asociado indirectamente a la idea de pérdidas, cualquiera sean las manifestaciones de éstas. La definición formal de rendimiento, es la razón entre la potencia mecánica útil para realizar trabajo y la potencia activa eléctrica suministrada para tal efecto. En este punto es donde debe ir centrada la atención pues la potencia suministrada es la suma de la potencia útil más las pérdidas ocasionadas producto del trabajo realizado, es decir:

<sup>2</sup> Jorge Romo, Motores de Inducción, Laboratorio de Energía, Universidad de Chile, 2006.

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{P_m}{P_m + \text{pérdidas}}$$

#### Ecuación 2.1. Rendimiento

Donde:

$\eta$ : eficiencia

$P_m$ : potencia mecánica en el eje del motor

$P_e$ : potencia eléctrica en bornes del motor

Un ejercicio sencillo, y bajo supuestos simples, sería ver qué porcentaje de los costos de operación representan las pérdidas de energía.

Para un motor de, por ejemplo 50 HP y cuya eficiencia es del 90%, suponiendo un valor de compra de 5000 USD, y con un precio estándar de energía de 100 USD/MWh, operando las 24 horas del día, 310 días al año, es decir un factor de utilización del 85% (valor modesto para la media de una planta papelera) y con un factor de carga del 70 % se obtiene que del total del trabajo útil, hay pérdidas superiores a 14500USD.

Considerando esto para una planta donde hay un elevado número de motores y que operan las 24 horas del día, con paros programados sólo para mantención, la suma asociada a pérdidas crece proporcionalmente y se justifica que haya esfuerzos en estudiar medidas de eficiencia energética.

Los aspectos más relevantes al momento de evaluar las pérdidas o más bien los factores que influyen en la degradación de la eficiencia son:

- Reparaciones: Cualquier reparación que se ejecute en el motor, implica que se modifican las condiciones originales de diseño o fabricación y evidentemente no se alcanzan los estándares en los cuales fue fabricado el equipo, en el caso más típico de reparación que corresponde al rebobinado, se pierde eficiencia en promedio alrededor del 2%.
- Calidad del voltaje de alimentación: Cuando la instalación es deficiente, o sencillamente por un control deficiente del voltaje, y éste es más bajo que el nominal, se produce un efecto en las pérdidas de Joule. Por otra parte, el voltaje debe ser equilibrado, mientras más difieran las magnitudes de cada fase, mayor alteración sufrirán los flujos magnéticos con la consiguiente pérdida en el núcleo. Además, se desequilibran las corrientes lo que acarrea aumento de las pérdidas Joule.
- Carga mecánica: Las pérdidas Joule se ven afectadas cuando el motor trabaja con carga diferente de la nominal.
- Confiabilidad del diagnóstico del estado de los motores. Es muy importante contar con una metodología de mantención, y un diagnóstico acertado del estado de los equipos. Si el diagnóstico no se da a tiempo, o es deficiente, las correcciones no se llevarán a cabo y el equipo no podrá corregirse o sustituirse. De hecho, parte importante del diagnóstico debiera ser la determinación de cuándo es conveniente dar de baja un equipo. Finalmente, si la falla no se detecta a tiempo, el paro de planta asociado a la intervención correctiva, implicará pérdidas en la producción.

## **2.3 CMPC. Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones.**

CMPC es una empresa fundada el 12 de Marzo de 1920 y desde esa época ha sido una de las principales empresas industriales en Chile, con una trayectoria de más de 90 años se ha consolidado y desarrollado en sus operaciones en negocios forestales, celulosa, papeles, cartulinas, productos tissue, papel periódico, bolsas industriales, cajas de cartón corrugado, productos escolares y de oficina, participando en más de 50 países en los cinco continentes. La industria tiene principalmente cinco áreas de negocio a través del holding de empresas: Forestal Mininco, CMPC Celulosa, CMPC Papeles, CMPC Tissue y CMPC Productos de Papel.

CMPC es una empresa integrada que realiza su trabajo industrial a través de las cinco filiales de negocios, antes mencionadas.

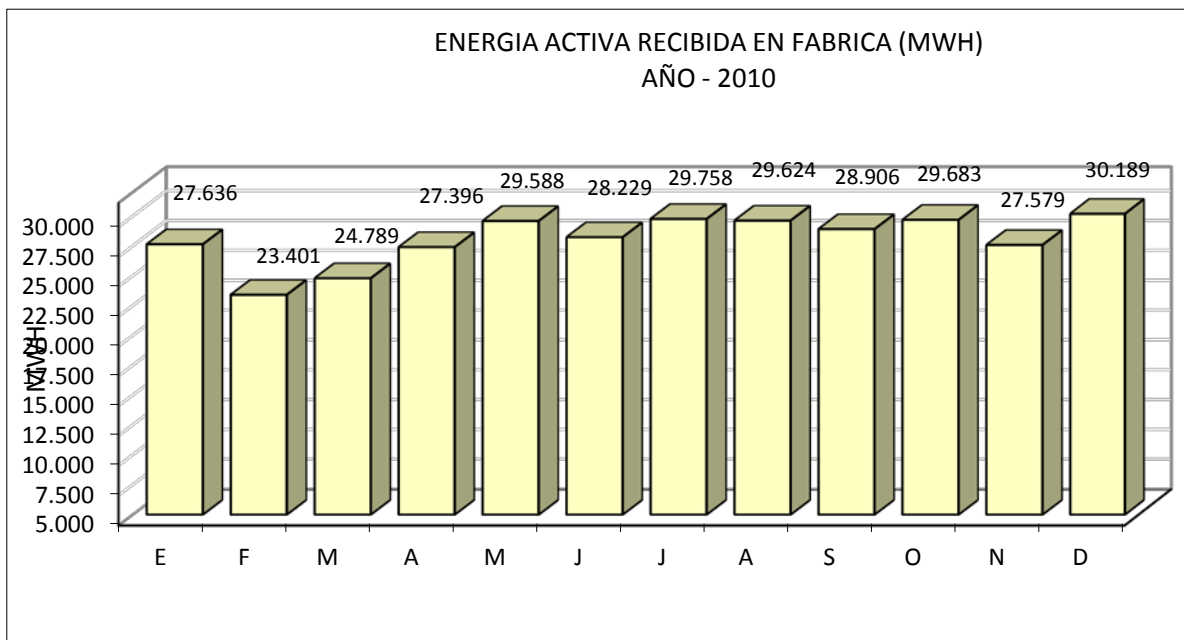
### **2.3.1 Papeles Cordillera S.A.**

Papeles Cordillera es una empresa de carácter privado perteneciente al conglomerado CMPC. Se dedica a la fabricación de papel y algunos subproductos tales como cajas de cartón, tubos, cartón corrugado, cartones para uso industrial, etc. En esta empresa se desarrolla el presente trabajo, dentro del área “Subgerencia de Ingeniería y Construcción”.

Se puede afirmar que la planta Papeles Cordillera tiene un consumo considerable de energía en términos cuantitativos, si se compara con otras plantas del sector industrial. Este hecho es uno de las motivaciones de este trabajo, pues las reducciones de energía en términos de eficiencia se relacionan con los afanes de cuidado ambiental de la empresa y además significan reducción de costos.

La ejecución de la manufactura propiamente tal en la planta de Papeles Cordillera, es llevada a cabo por tres máquinas, que son denominadas, en orden de envergadura e importancia como Máquina 20, Máquina 10 y Máquina 8, más adelante se indicará porqué este trabajo sólo se remite a la máquina 20 y la información y estudios están referidos a ésta en particular. Sólo basta decir por ahora que representa más del 95% del total de la producción.

Se muestra un gráfico en la Ilustración 2.2 con los consumos de energía activa durante los meses del año 2010.



**Ilustración 2.2. Energía activa consumida en papeles cordillera en 2010.**

## 2.4 Metodología de desarrollo.

En primer lugar se debe establecer ciertas cotas de trabajo y algunas observaciones con respecto de los aspectos que se quieren afrontar para lograr un aumento en la eficiencia de la planta papelera.

El trabajo se realiza bajo dos líneas de estudio:

1. Estudio de predicción de fallas de los motores de la planta mediante un modelo teórico y luego un modelo computacional o dispositivo apropiado.
2. Evaluación del recambio o sustitución de motores de planta que se encuentren en estado regular pero que tengan algún grado de antigüedad, por motores eficientes.

Para abordar tales actividades se partirá recopilando información estadística de la planta y además en los casos que sea necesario, se realizarán mediciones en terreno. Paralelamente se seleccionará el nivel de estudio en función de los procesos que son más importantes y asimismo se focalizará el análisis en los motores que representan mayor consumo. Durante el desarrollo también se aplicarán otros criterios de selección del nivel de estudio.

En un plano particular, el primer ítem de este estudio está referido al mantenimiento predictivo. Se justificará por qué este tipo de mantención es más eficiente en términos de utilización de recursos, con respecto al mantenimiento correctivo y luego se propondrá un modelo de mantención. En particular, se estudiará un tipo de procedimiento que utiliza la transformada de Hilbert para la predicción de fallas, mediante el análisis de la corriente.

Para abordar el segundo apartado, se desarrollará una evaluación técnica y económica, vale decir, se estudiará y dimensionará el gasto de reemplazar los motores que presenten falla con frecuencia no habitual, o cuya eficiencia tenga evidencias de disminución y finalmente motores cuyos factores de eficiencia estén deteriorados. También, como modelo preliminar, se evaluará el costo que representa a la planta el recambio de dichos motores en términos de operación e interrupción de producción.

A continuación de los lineamientos antes definidos, se procederá a seleccionar la información que se ha logrado recopilar de planta, según los criterios de selección explicitados en su momento.

## 2.5 Antecedentes de planta.

Estos antecedentes, se refieren en este capítulo y en los posteriores, a la planta de Papeles Cordillera. En primer lugar se clasifica el parque motor en detalle y luego de ello se procede a estudiar las medidas de uso eficiente de energía con sus respectivos análisis. El parque motor descrito es el perteneciente a la que de aquí en adelante se denominará Máquina 20.

### 2.5.1 Clasificación del Parque Motor.

Es conveniente caracterizar el parque motor según variables y establecer rangos de ciertas categorías para hacer el análisis de forma más contundente. Para este efecto se utilizarán las siguientes variables:

- Potencia Nominal



- Factor de ocupación

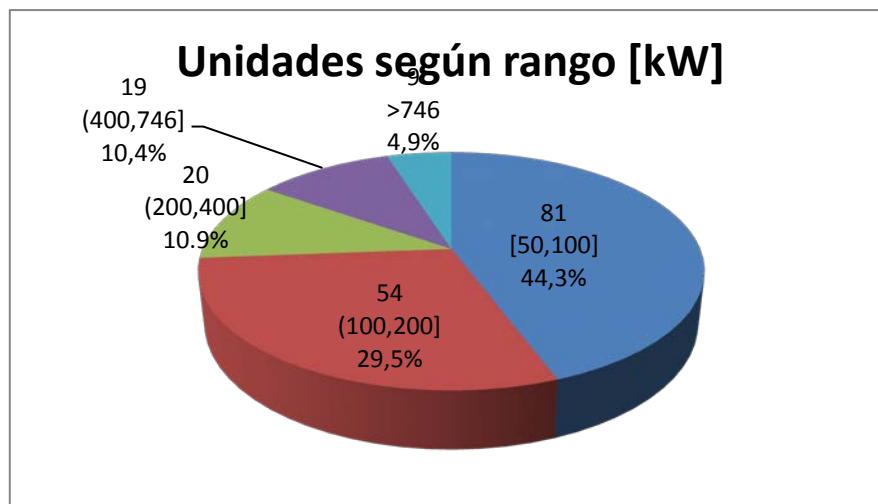
- Factor de carga

Rangos de potencia (kW)	Unidades	Potencia Instalada kW
[50,100]	81	5586
(100,200]	54	7958
(200,400]	20	6395
(400,746]	19	9766
>746	9	8100

**Tabla 2.1. Unidades de motores según rango de potencia y potencia instalada.**

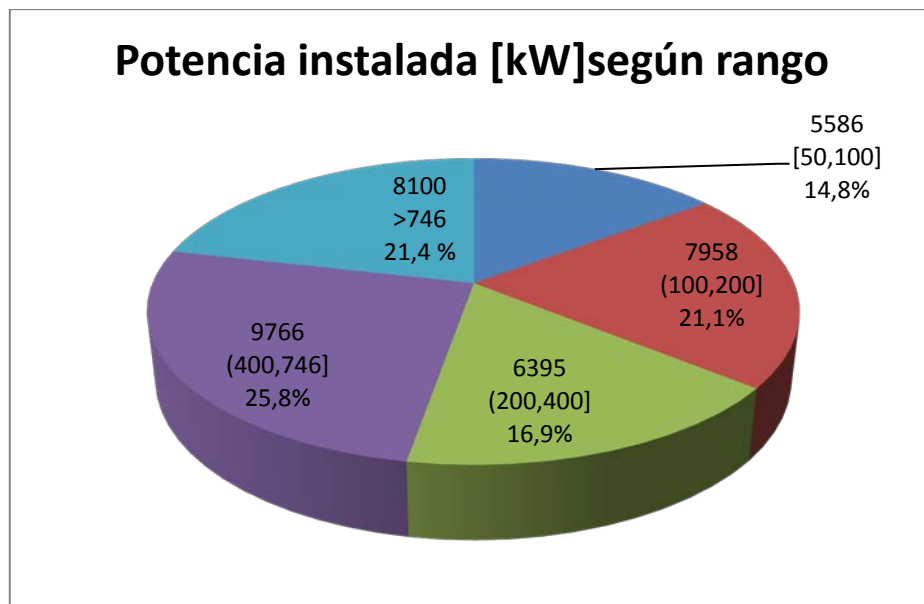
Para los rangos de potencia establecidos, las unidades de motores son considerablemente mayores para rangos bajos de potencia, sin embargo, como era de esperar, la potencia instalada no sigue esa tendencia.

En particular, es posible ver en un diagrama circular que la mayor potencia instalada se produce en el rango de 400 a 746 kW.



**Ilustración 2.3. Unidades según rango.**

El menor porcentaje de unidades, con sólo un 4,9 % de la torta, corresponden a los motores de potencia nominal mayor a 746 KW, sin embargo como se podrá notar en el gráfico a continuación, la potencia instalada es mayor a un quinto teniendo un 21,4% del total.



**Ilustración 2.4. Potencia instalada según rangos.**

Por otra parte, la capacidad instalada para rangos de potencia entre 400 y 746 kW, como ya se dijo tiene el mayor porcentaje, alcanzando un 25,8 %.

Con respecto a los otros dos criterios de clasificación, factor de ocupación y factor de carga, en la planta ambos se pueden especificar de forma concreta pues los denominados paros de planta son estrictamente vinculados a un calendario y por otra parte, dependiendo del tipo de producto que se esté fabricando se ajusta la carga mediante una referencia dada. El tipo de producto hace referencia particularmente al espesor del papel lo cual determina los parámetros de operación de las máquinas.

En el caso del factor de ocupación, se tiene que sobre el 95% de los motores de la planta operan en promedio 8400 horas al año, vale decir, cercano al 96% de ocupación anual. Este factor de ocupación de 0.96 normalizado en por unidad, permite entender el intensivo uso al que son sometidos los motores de la planta, y por tanto se hace notorio que es imprescindible contar con un modelo estricto de mantención y un calendario estudiado de paros de planta con el fin de reducir al mínimo los tiempos de detención y de reparación.

Con respecto al factor de carga, hay una situación un tanto particular, pues se dispone de un margen amplio de holgura con respecto a los parámetros de operación normales, cuando se opera bajo ciertas condiciones de fabricación. Este hecho deja en evidencia que ante eventuales sobrecargas o exigencias de producción voluntarias o fallas inesperadas, el sistema podría responder positivamente en función del porcentaje de sobredimensionamiento. Sin embargo, por otra parte, es claro que hay un margen de potencial aumento o reducción de consumo al, por ejemplo, disminuir el margen de holgura de los parámetros de operación con los valores nominales, pues si un motor trabaja más cerca de sus valores nominales, aumenta su eficiencia.

No obstante lo anterior, y esto quedará claro cuando se describa el proceso productivo, para otro tipo de operación, dependiendo de la fabricación particular que se esté llevando a cabo, este margen de holgura deja de ser tal y el factor de carga supera el 70%.

## 2.5.2 Descripción del proceso productivo

La Papelera comercializa alrededor de 320 mil toneladas al año de una distinta gama de papeles. Los productos que entrega son principalmente para la fabricación de papel corrugado, placas de yeso y otras aplicaciones de uso industrial y de comercio masivo.

La gama de papeles en cuanto a su descripción vinculante al proceso, están caracterizados por parámetros como gramaje, velocidad y ancho. Desde el punto de vista global, hay 6 familias de papeles que se fabrican;

1. Liner Blanco
2. Liner Blanco económico
3. Construcción
4. Tesliner
5. Liner Cordillera
6. Onda

Cada una de estas familias tiene categorías las cuales constituyen la gama completa de productos.

La descripción operacional de la máquina, que en adelante se denominará como Máquina 20 ó MP20, se define según los parámetros de producción que se muestran en la tabla 2.2

Gramajes	110-300 gr/m <sup>2</sup>
Velocidad	450-1000 m/min
Ancho total del pope	4.960 mm Papeles café 5.080 mm . Papeles construcción
Ancho útil bobinadora	4.900 mm Papeles para corrugar 5.040 mm. Papeles Ivory
Diámetro en bobinadora	1.450-1.800 mm
Ancho máximo de un rollo	2.500 mm ( con diámetro de 1,45 m)
Ancho mínimo de un rollo	450 mm ( con diámetro de 1,45 m) 600 mm ( con diámetro de 1,80 m)
Números de cortes longitudinales	5 cortes
Ancho mínimo de corte	580 mm
Diámetro de bobina	3 y 4"

Tabla 2.2. Parámetros de operación de la Máquina 20.

Esta máquina corresponde a la de mayor envergadura e importancia dentro de las instalaciones de Papeles Cordillera. Produce alrededor del 90% de la producción total de la planta.

El proceso productivo propiamente tal, se puede clasificar en las etapas de:

1. Materias Primas
2. Preparación pastas

3. Caja de entrada
4. Sección prensas
5. Sección secado
6. Acabado de papel en máquina
7. Acabado de papel fuera de máquina.

De esta forma se tiene que en la etapa 3 a 6 se produce el mayor gasto de energía eléctrica, pues todos los accionamientos son producidos por torque motriz.

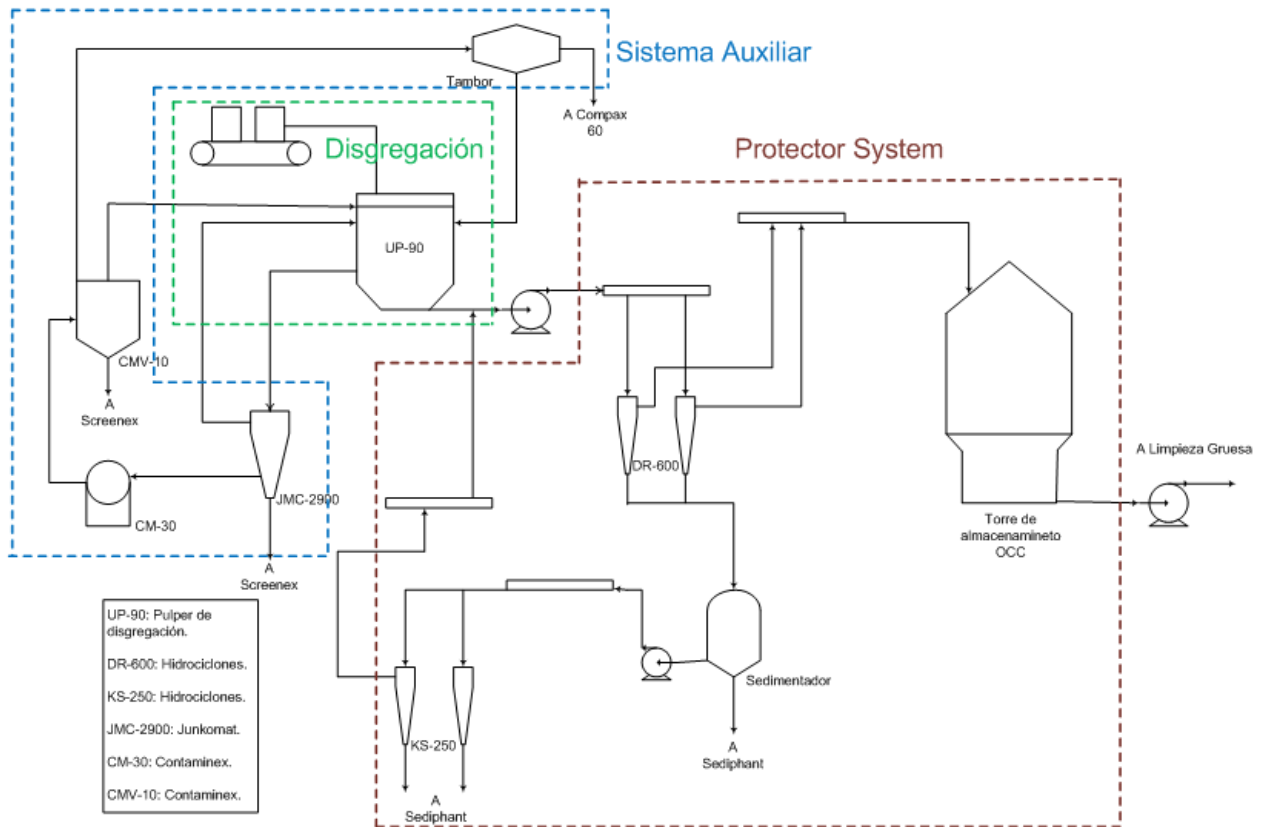
Descripción breve de las etapas.

1. Materias primas. Se refiere a la adquisición de las materias primas, acopio de las mismas, clasificación y la forma en que serán cargadas. En la planta se trabaja con papel reciclado que es clasificado según forma, tamaño, color y otras características de modo tal, que se realiza el proceso de carga en un pulper<sup>3</sup>, dando inicio al proceso productivo.
  
2. Preparación pastas. Esta etapa también es previa al proceso productivo de la máquina, se define como el conjunto de instalaciones en que se disgrega la materia prima, ya sea papel reciclado o celulosa mediante la incorporación de agua al pulper. La disgregación consiste básicamente en desintegrar el papel mediante la agitación y suspensión en agua. Luego de ello procede la depuración, etapa prácticamente exclusiva para papel reciclado, y que requiere un diseño particular para cada materia prima. Permite la eliminación de las impurezas. Finalmente, la subetapa de refinación permite un trabajo a nivel fibrilar de limpieza y condicionamiento para los pasos posteriores.

La Ilustración 2.5, muestra un esquema general de las etapas 1 y 2 utilizando una descripción de acuerdo a la máquina 20 de la planta.

---

<sup>3</sup> Un pulper, en un proceso papelerero, es un tanque generalmente de acero inoxidable provisto de un rotor con aspas que permite establecer una agitación violenta y circulación dentro del tanque. La mezcla adecuada se libera mediante una cámara de extracción ubicada debajo del rotor.



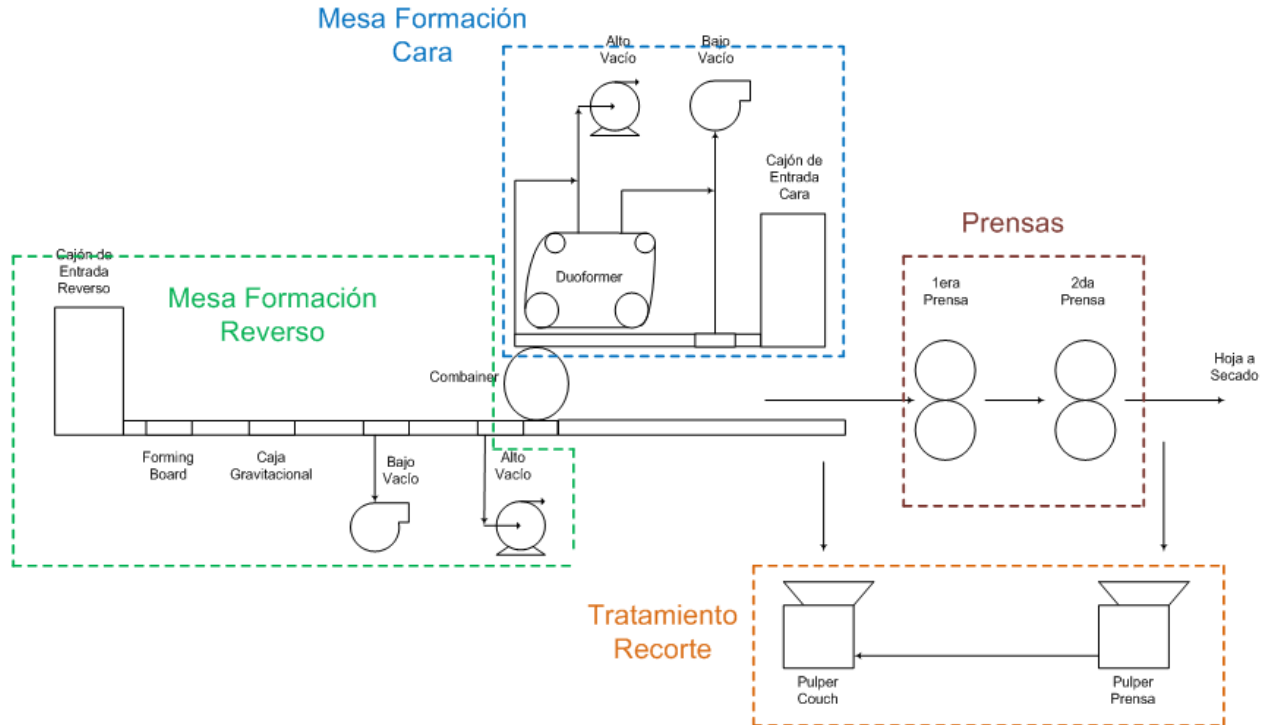
**Ilustración 2.5. Diagrama de Disgregación y limpieza.**

3. Caja de entrada. Aquí empieza la máquina papelera propiamente tal, es un elemento muy importante pues tiene influencia determinante sobre el perfil de la hoja y en menor medida sobre la formación de la hoja. En cuanto a diseño se componen de 3 partes principales; Distribuidor, cuerpo interior y labios de salida.
4. Prensado. El proceso básico de prensado consiste en transferir una parte del agua de la hoja. Se puede subdividir en 4 fases:
  - Fase 1: Comienza la compresión de la hoja y el fieltro.
  - Fase 2: La presión ejercida sobre la hoja la satura de agua.
  - Fase 3: La presión empieza a decrecer.
  - Fase 4: Tanto el papel como el fieltro<sup>4</sup> se expanden.

En la Ilustración 2.6 se muestra un esquema que representa la etapa 3. En el caso particular de la máquina 20, se cuenta con doble línea de tratamiento, a cada una de las líneas se denomina cara y reverso pues una

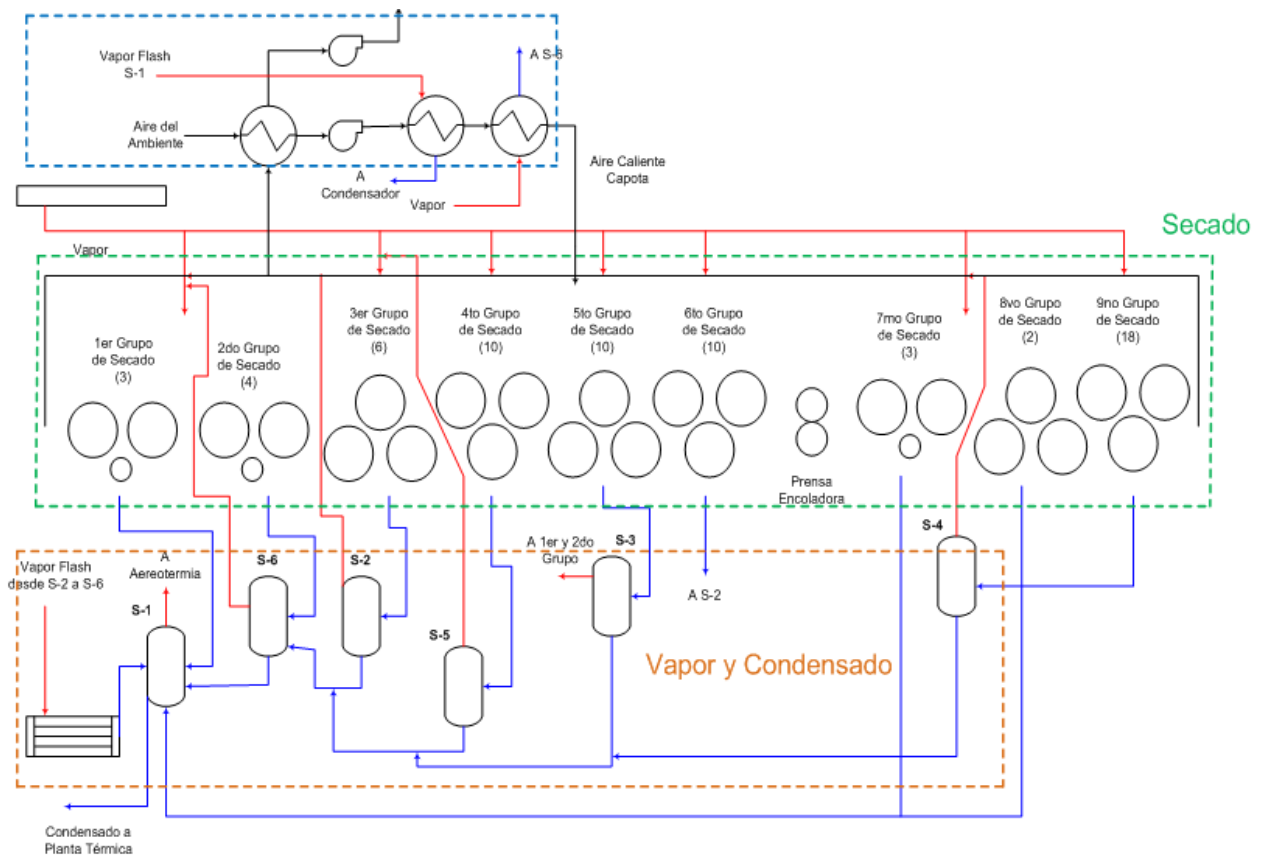
<sup>4</sup> El fieltro es un producto de ingeniería que tiene estructura textil, con características permeables, de composición sintética, relativa incompresibilidad y capacidad de extracción y almacenamiento de volúmenes importantes de agua. Deben atender además a una serie de requerimientos mecánicos, hidráulicos y de calidad superficial.

vez que la pasta entra a cada uno de los cajones de entrada, y sale por el extremo opuesto, pliegan dándole el gramaje y dimensión especificada.



**Ilustración 2.6. Esquema de la etapa de entrada a la máquina y luego el prensado.**

5. Secado. Esta etapa consiste básicamente en separar el agua de las fibras. Se puede explicar en 4 fases.
  - Fase 1: Ciclo de secado en 4 fases.
  - Fase 2: Transmisión de calor.
  - Fase 3: Cilindro secador.
  - Fase 4: Secado del papel tissue.
  
6. Acabado de papel en máquina. En esta etapa se somete al papel a un paso entre rodillos de acero para igualar la superficie del papel, obteniendo lo que se denomina alisado en máquina. La serie de rodillos se suele llamar lisa y se compone de 3 a 8 rodillos de fundición dura, rectificadas y pulidos. Luego se produce el enrollado al final de la máquina mediante la enrolladora de tambor-soporte. El enrollado debe cumplir con dos exigencias básicas, primero debe ser de modo continuo de modo que el recambio del rollo no interrumpa el proceso y segundo, debe tener una tensión no tan elevada de forma de evitar que el papel reviente al interior del rollo pero tampoco baja evitando que se formen arrugas.



**Ilustración 2.7. Esquema de secado.**

En la Ilustración 2.7 el primer bloque corresponde al área de aerotermia, en el siguiente bloque se aprecian claramente los 9 grupos de secados con sus respectivos rodillos.

7. Acabado de papel fuera de máquina. En esta etapa se produce el bobinado, proceso con el que se facilitan las operaciones posteriores, tales como el transporte, cortado, embalaje y expedición. Además, dado que es un proceso cíclico pero discontinuo, su velocidad debe ser unas 3 veces superior al de la máquina con el fin de seguir su ritmo. En el cortado se le da el ancho y diámetro adecuados según los requerimientos de uso posterior que en general corresponden a los requerimientos del cliente.

En la Ilustración 2.8, se presenta un esquema del acabado de papel dentro y fuera de la máquina. El producto final de la máquina corresponde a un rollo que se denomina jumbo y es de proporciones tan grandes como la máquina lo permita, luego se bobina y corta como se explicó en la etapa 7.

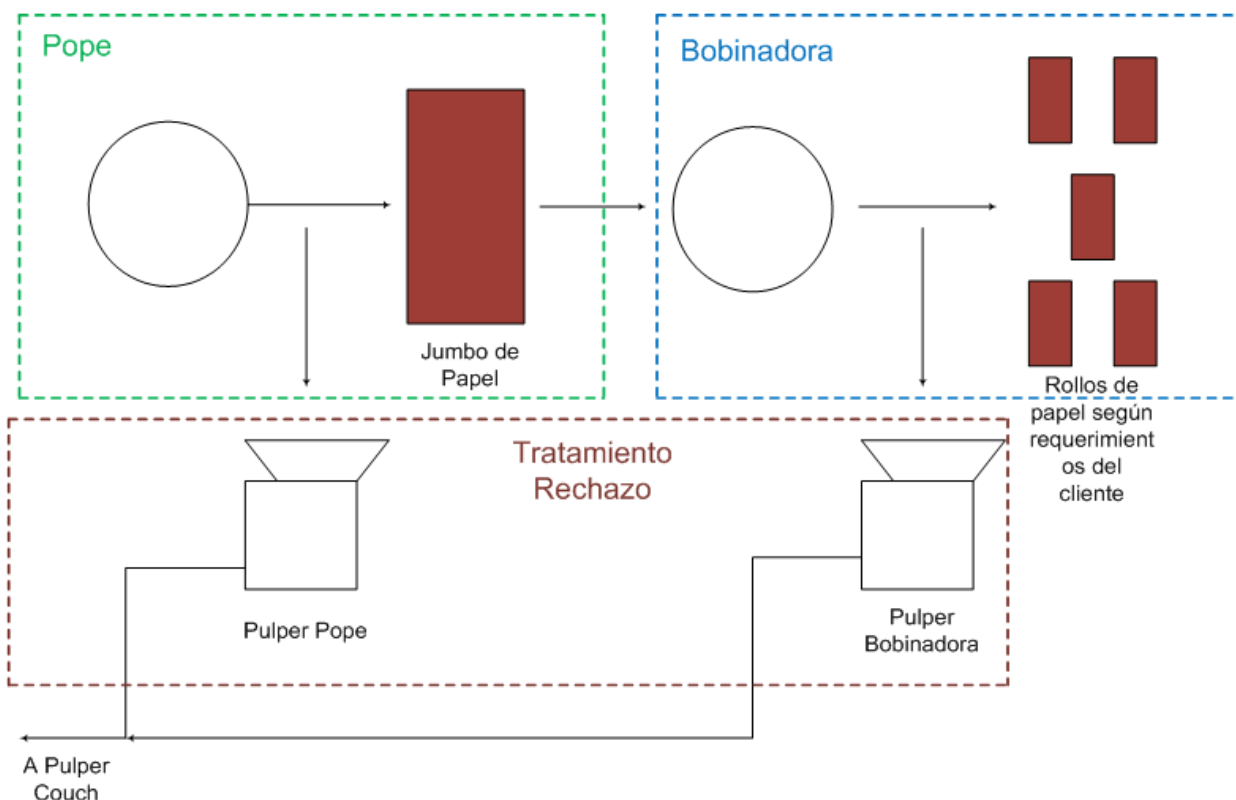


Ilustración 2.8. Esquema del acabado del papel.

### 2.5.3 Consumos generales en la planta.

La planta consumió en 2010 336,8 GWh de energía eléctrica, considerando todas las instalaciones de la fábrica<sup>5</sup>. Sin embargo en el presente estudio es importante lo que sucede con la Máquina 20. Tal como se describió, en esta máquina es donde se produce más del 90 % del tonelaje de papel total. El consumo para el período de 2010 fue de 167.653.188, lo cual representa un 72,25 % del consumo total de la planta. Esta situación se muestra en la Tabla 2.3, donde la máquina 20 es el ítem que representa el mayor consumo, con respecto a la fábrica, es decir incluyendo la planta de papeles Tissue y la planta Chimolsa, que son parte de CMPC pero al igual que Papeles Cordillera, son independientes en términos administrativos.

La máquina 20 es una instalación que consta de 2 niveles de máquina además de niveles parciales de salas de monitoreo, salas de máquinas y otros. Produce 300 mil toneladas de papel al año. Tiene una superficie estimada de 18.000 m<sup>2</sup> de construcción, sin contar las bodegas de carga y espacios de acopio de materia prima. La máquina 20 data del año 2001 y desde entonces se alimenta mayormente de material reciclado. Esta máquina se constituye como la razón principal de estudio y su importancia en lograr un uso eficiente de energía, de mejoras en sus equipos, y de la gestión del mantenimiento de equipos es vital para la planta de Papeles Cordillera. Más aún, si se considera que una intervención en la máquina es exitosa, y que los

<sup>5</sup> Cuando se hace mención a "la fábrica", se incluye a la planta contigua de las empresas Tissue y Chimolsa, filiales de CMPC al igual que Papeles Cordillera, esto pues ambas plantas tienen ciertas instalaciones en común con Papeles Cordillera, pero son independientes en todos sus aspectos administrativos.



planteamientos y análisis tanto técnicos como económicos que en este trabajo se logren, podrían eventualmente extrapolarse a las dos máquinas de menor envergadura restantes que hay en la planta.

Item	Consumo	Porcentaje c/r a fábrica	Porcentaje c/r a planta
MAQUINA #7	176383	0,05	0,08
MAQUINA #8	16544520	4,91	7,13
MAQUINA #10	9797487	2,91	4,22
MAQUINA #20	167653188	49,78	72,25
PTA.TRATAMIENTO-1+ GUILLOTINA	5536257	1,64	2,39
PTA.TRATAMIENTO-2	1556746	0,46	0,67
SALA DE CONVERSIÓN + SAT. HAUBOLD	1364	0,00	0,00
DAV	339085	0,10	0,15
PTA.DILTS	1411399	0,42	0,61
CONDENSADO	115656	0,03	0,05
PTA. AGUA INDUSTRIAL	1791054	0,53	0,77
TRANQUE	13460	0,00	0,01
CONDENSADORES - G..SÍNCRONO	187596	0,06	0,08
AUX. PTA TÉRMICA + O. INVERSA + EA	4106218	1,22	1,77
COMPRESORES	7304801	2,17	3,15
LABORATORIO FÍSICO	118611	0,04	0,05
MANTENCIÓN	457970	0,14	0,20
ADMIN.-ALUM. EXT.-SEG.-RCI-ES	805104	0,24	0,35
CLUB SOCIAL	17352	0,01	0,01
ESTADIO	3781	0,00	0,00
PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTE	11648273	3,46	5,02
EXTRUSORAS	1526744	0,45	0,66
BUMA	5028	0,00	0,00
SOREPA	30140	0,01	0,01
VAPORES INDUSTRIALES	899677	0,27	0,39
TOTAL PAPELES	232047894	68,90	100,00
		0,00	
TOTAL CHIMOLSA	14565813	4,33	
		0,00	
TOTAL TISSUE Y MP-14	90165794	26,77	
		0,00	
TOTAL FABRICA	336779501	100,00	

Tabla 2.3. Consumos de planta y fábrica según áreas y equipos.

## 2.5.4 Caracterización del sistema eléctrico de Papeles Cordillera.

Se describirá el sistema eléctrico de la Papelera con el fin de acotar de mejor manera el nivel de estudio. Además es necesario conocer a fondo el sistema para analizar la eventual incorporación de equipos y en general, la estructura y funcionamiento del sistema de abastecimiento eléctrico.

Papeles Cordillera tiene un contrato de energía y potencia con Colbún S.A. En ese marco, el suministro se realiza a través de la línea de Alta Tensión, Maipo de 110 KV, que conecta a la subestación Cordillera, de propiedad de Papeles.

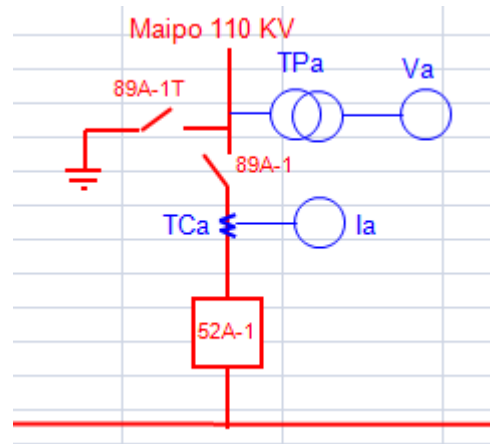
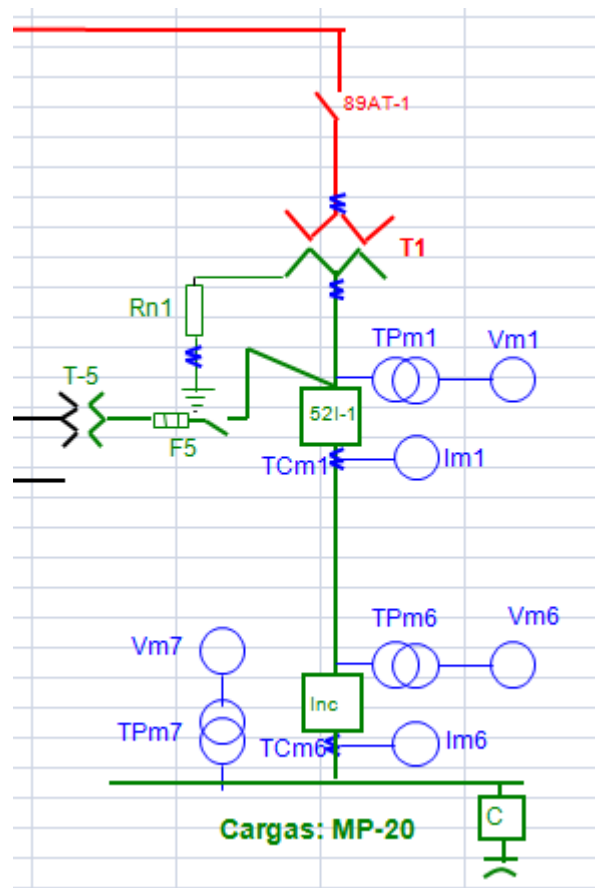


Ilustración 2.9. Diagrama de conexión Maipo-Subestación Cordillera.

En la Ilustración 12, el diagrama muestra que de la línea de alta tensión Maipo, sale la conexión a la barra de la subestación Cordillera, se cuenta con un seccionador (89A-1T) y los respectivos transformadores de medida, y el interruptor 52A-1.

El diagrama de la subestación se muestra en la Ilustración 2.10, omitiendo la alimentación desde la barra principal, hasta la fábrica Tissue, y mostrando sólo la conexión a la máquina 20 y los servicios auxiliares.



**Ilustración 2.10.** Diagrama de conexión desde la barra principal de la subestación.

La parte izquierda de color negro, corresponde a los servicios auxiliares. El transformador T1 transforma la energía proveniente desde Maipo de 110 kV a 6,3 kV.

Las cargas de la máquina 20 se alimentan en 690 V en su gran mayoría, excepto el grupo de motores correspondientes a los refinadores que se alimentan en 6 kV.

### 3. Confiabilidad y Predicción de fallas

La mantención de motores es un aspecto que requiere aunar criterios en una planta, esto es, definir políticas que indiquen por ejemplo si se realizará mantenimiento predictivo o mantenimiento correctivo. Dependiendo de dichas políticas, la planta usará ciertas tecnologías o recurso humano.

En este contexto, hay ciertas consideraciones previas que deben ser vistas.

#### 3.1 Consideraciones Previas

Alrededor de un 30% de todas las fuentes mundiales de energía primaria son empleadas para generar energía eléctrica<sup>6</sup>, y, casi toda ella, es transmitida y distribuida mediante sistemas de tensión alterna de 50 Hz o 60 Hz. Hoy día es más importante que nunca diseñar y operar sistemas eléctricos que, no sólo tengan la máxima eficiencia practicable, sino que además tengan el más alto grado de seguridad y confiabilidad.

En los sistemas eléctricos el hecho de, por ejemplo, no disponer de electricidad en momentos inesperados, trae graves consecuencias productivas. Un minuto sin electricidad causará: la pérdida de los datos almacenados en un computador; la detención de un motor, y por tanto de una cadena productiva; que una operación médica se vea interrumpida o alterada; es decir, en sistemas eléctricos se debe tender a tener la máxima confiabilidad posible debido a que las consecuencias son extraordinariamente relevantes.

Son numerosas las acciones que es posible realizar para reducir, al menos parcialmente, la incertidumbre de quedar sin electricidad en un proceso. Así por ejemplo, podemos distinguir los siguientes grupos de acciones:

a) Disponer elementos en paralelo en el sistema. Esta alternativa consiste en diseñar de tal modo que si falla un componente el sistema continúa funcionando. Son ejemplos de esta opción el disponer de un doble circuito de transmisión de electricidad entre el generador de electricidad y la ciudad o industria que se pretende alimentar; iluminar con dos ampolletas alimentadas independientemente un acceso peligroso; disponer más de un circuito de energización para una casa, etc.

b) Evitar los elementos en serie en el sistema. Esta alternativa consiste en evitar que el funcionamiento de un sistema dependa de la operación simultánea de varios elementos de confiabilidad baja. Un ejemplo de empleo de elementos en serie es el caso del movimiento de una correa transportadora con un solo motor y un solo convertidor de frecuencia; en este sistema basta que el motor o el convertidor de frecuencia falla para que la correa de transporte se detenga. Otro ejemplo es el de la iluminación de un aviso publicitario mediante múltiples ampolletas en serie; basta que una falle y el aviso queda totalmente apagado.

c) Mejorar la confiabilidad mediante el empleo de diseños y tecnologías adecuadas. En este aspecto, son múltiples las acciones que es posible llevar a cabo:

- Mejoramiento de instalaciones eléctricas domiciliarias e industriales. Es común observar instalaciones eléctricas en que los consumos son notablemente superiores a los límites de diseño debido al

---

<sup>6</sup> Alfredo Muñoz Ramos, Diagnóstico del Estado de una Máquina Eléctrica, Apuntes de clases. Máquinas Eléctricas para la Industria y la Minería, Universidad de Chile, 2011.

crecimiento del uso de la electricidad en todo tipo de actividad. Los enchufes múltiples conectados a un enchufe único son un ejemplo común que debe ser evitado.

- Mejoramiento de los sistemas de compensación de factor de potencia. Los condensadores entran en resonancia con las reactancias de los transformadores de alimentación e incrementan notablemente la cantidad de armónicas, superándose los límites establecidos por normas, llegando incluso a la explosión de equipos e interruptores.

- Mejoramiento de los sistemas de puestas a tierra y cables de neutro. Las corrientes armónicas que circulan por el neutro de los sistemas provocan diferencias de voltaje entre neutro y tierra que pueden dañar diversos equipos electrónicos. Las mallas de tierra son diseñadas para proporcionar un camino definido de regreso a la fuente de energía con impedancia suficientemente baja, sin embargo, a las corrientes armónicas esta impedancia crece y, por tanto aparecen problemas no previstos por el diseñador.

d) Disponer de reservas de abastecimiento de potencia y energía mediante múltiples fuentes. Son ejemplos de estos mejoramientos: la construcción de tranques de reserva de energía hidroeléctrica, el disponer de baterías y/o generadores diesel de respaldo, etc.

e) Aplicar y cumplir las normativas y recomendaciones referentes a las características de la red eléctrica de alimentación. Son ejemplos de esta opción: emplear conductores adecuados para evitar calentamientos que aceleren su vida útil, impedir subidas y bajadas de voltaje más allá de las permitidas, impedir que la distorsión armónica sea superior a la permitida, etc.

## 3.2 Definiciones relacionadas con la confiabilidad de un sistema eléctrico.

### 3.2.1 Disponibilidad de energía eléctrica de un equipo eléctrico.

La disponibilidad de un sistema se define mediante la ecuación:

$$\text{disp} = \frac{t_{\text{serv}}}{t_{\text{total}}}$$

**Ecuación 3.1 Disponibilidad de un sistema**

$t_{\text{serv}}$  : tiempo con servicio con calidad adecuada.

$t_{\text{total}}$  : tiempo total de observación.

$\text{disp}$  : disponibilidad del equipo.

Ejemplo:

Un usuario de un sistema eléctrico no dispuso de energía durante 1 hora, del total 8760 horas que tiene un año. Así, la disponibilidad del sistema eléctrico es:

$$\text{disp} = \frac{8759}{8760} = 0.999886$$

#### Ecuación 2.2 Disponibilidad de un Sistema Eléctrico

Es decir, la disponibilidad del sistema fue de 99.986%. El período de no disponibilidad de energía pudo haber sido un solo evento (sin energía), en este caso de una hora de duración, o, por ejemplo, 360 eventos sin energía de 10 segundos de duración cada uno. Desde el punto de vista del usuario ambas situaciones no son idénticas ya que un corte de energía lleva asociado un tiempo de reposición del o los equipos que quedaron sin energía durante, por ejemplo, 10 segundos. Si este tiempo de reposición es 1 hora, la disponibilidad del sistema eléctrico, desde el punto de vista del usuario, en el caso que existan 360 eventos sin energía es:

$$\text{disp} = \frac{t_{\text{total}} - (t_{\text{sin serv}} - t_{\text{rep}})}{t_{\text{total}}}$$

#### Ecuación 3.3 Disponibilidad de un Sistema Eléctrico

$t_{\text{sin serv}}$  : tiempo sin servicio

$t_{\text{rep}}$  : tiempo de reparación.

Luego

$$\text{disp} = \frac{8760 * 60 * 60 - (360 * 3600 + 360 * 10)}{8760 * 60 * 60} = 0.959$$

#### Ecuación 4.4 Disponibilidad de un Sistema Eléctrico

Es decir, para el usuario, la disponibilidad sería de un 95.9% y no un 99.986%.

### 3.2.2 Confiabilidad de un equipo eléctrico.

El concepto básico de confiabilidad se relaciona con la cantidad de componentes de un equipo que fallan en un período de tiempo  $t$ . Si bien la definición precisa de confiabilidad debe realizarse en función de la probabilidad de ocurrencia de fallas, tal como se explicará en el párrafo 3.2.4, es también útil emplear el siguiente cociente  $kconf(t)$  como representativo de la confiabilidad de un componente:

$$kconf(t) = \frac{compviv(t)}{comptot(t)}$$

**Ecuación 5.5 Coeficiente de confiabilidad**

$compviv(t)$  : componentes que sobreviven en buen estado, en un período  $t$ .

$compfall(t)$  : componentes que fallan, en un período  $t$ .

$comptot(t)$ <sup>7</sup> : componentes probados, en un período  $t$ .

$kconf(t)$  : confiabilidad, en un período  $t$ .

Ejemplo:

Al probar 1000 ampolletas de filamento se comprueba que:

- a) a las 100 horas de operación se han quemado sólo 5 ampolletas
- b) a las 500 horas de operación se han quemado 500 ampolletas

Empleando la ecuación para el cálculo del coeficiente  $kconf(t)$ , se obtiene

$$kconf(100 \text{ horas}) = \frac{1000 - 5}{1000} = 0,995 \text{ (99,5\%)}^8$$

**Ecuación 6.6 Coeficiente de confiabilidad ejemplo**

---

<sup>7</sup> Por cierto que:  $comptot(t) = compviv(t) + compfall(t)$ .

<sup>8</sup> Esto significa que en un lapso de 100 horas de operación continua, el 99,5% de las ampolletas funcionan, o que el 0,5% de ellas,  $(1 - 0,995) * 100$ , se queman.

$$k_{\text{conf}}(500 \text{ horas}) = \frac{500}{1000} = 0,5 \text{ (50\%)}$$

Ecuación 7.7 Coeficiente de confiabilidad resultado ejemplo

### 3.1 Diagnóstico de estado de motores y evaluación de alternativas de mantenimiento.

Dada la importancia que tienen los motores en todas las áreas de la industria en términos de producción como de consumo de energía eléctrica, es claro que una falla que implique paro de planta inesperado o no programado, conlleva problemas de uso de recursos, pérdida de producción, y por consiguiente pérdidas económicas. Ya se ha hablado de la importancia de disponer de suministro de energía con un alto grado de confiabilidad, pero en este apartado, se hará mención exclusiva de la confiabilidad de un motor.

En este contexto, las mantenencias de tipo predictivo se han erguido como una herramienta que, utilizada en forma apropiada, reporta enormes ahorros a la industria. Tradicionalmente se han utilizado esquemas de diagnóstico de estado de los motores que, básicamente consisten en la medición aleatoria o programada de parámetros electromecánicos de la máquina, como a la vez de las condiciones externas de operación. En este análisis caben en primer lugar la corriente, voltaje, torque, frecuencia y velocidad de operación, y a la vez, comportamiento vibratorio, apriete de los pernos de anclaje, suciedad del motor, ruido, humo, etc. Esta medición, en principio, está a cargo de un operador que, usando elementos de medición y sus sentidos, lleva una bitácora de mediciones donde hace acopio de la información de cada equipo.

Es importante decir en este punto, que dentro de la política de mantención de una fábrica, se debe separar el mantenimiento predictivo, del correctivo.

-El mantenimiento correctivo se refiere a aquel en que una vez que, se detecta cierta falla, se procede a hacer cambio de la pieza o del motor completo, con las consecuencias descritas en el primer párrafo. Esta falla puede ser incipiente, dando muestras de fatiga que no se alcanzaron a medir a tiempo, no se detectaron por falta de monitoreo visual o por la inaccesibilidad a la máquina o, por otra parte, intempestiva, como consecuencia de por ejemplo la rotura de una correa afectando el rotor del motor por embalaje, o por sobrecalentamiento.

-El mantenimiento predictivo, y que es el que se abordará en el presente trabajo, se refiere a un plan de mantenimiento programado, mediante algún modelo que determine cierta probabilidad de falla en el tiempo. Una de las herramientas más aceptada para este tipo de análisis es la distribución de Weibull, que permite mediante un registro histórico de fallas, determinar dicha probabilidad. Sin embargo, otra herramienta que permitiría una alta probabilidad de certeza en la detección de fallas incipientes, es el análisis continuo de la onda de salida de los parámetros eléctricos, particularmente de la corriente. En el mercado hay dispositivos que realizan análisis de este tipo de análisis tal como el MCM (motor condition monitor), que permite indicar el estado del motor en tiempo real y detectar cuando una falla recién empieza a manifestarse.

Como se indicó, la idea es enfocarse en el análisis predictivo, por lo que se analizarán los dos métodos descritos; el análisis de Weibull y El análisis de la corriente mediante la Transformada de Hilbert.



Idealmente, este tipo de análisis permiten tener acceso remoto a equipos que un operador, físicamente, no tendría. Además, hay ventajas evidentes como lo son el análisis simultáneo de los equipos en la pantalla de un computador, y por otra parte se evitan las exposiciones a un accidente en el curso de las mediciones. Finalmente, nunca se debe descartar el ojo humano en la detección de anomalías. O el resto de los sentidos como el olfato.

La gran diferencia que existe entre las dos alternativas abordadas, es que el análisis de Weibull requiere de un histórico de fallas, mientras que el análisis de la onda de corriente se basa en un modelo de comportamiento ideal, y si bien necesita un set point, no requiere de una base de datos con fallas por motor.

### 3.2 Análisis Predictivo Utilizando la Distribución de Weibull.

La distribución de Weibull se define como una distribución de probabilidades continua, cuya función de densidad de probabilidad está dada como se muestra en la ecuación 3.8.:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} * \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} * e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad x \geq 0$$

**Ecuación 3.8. Densidad de probabilidad de Weibull**

Donde:

$\alpha, \beta \geq 0$  son parámetros de la función de probabilidad.

La función de densidad acumulada, está dada por la siguiente expresión:

$$F(X) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}$$

**Ecuación 3.9. Densidad acumulada.**

El valor medio de la duración de un equipo, modelado por la distribución de Weibull, está dado por:

$$E(X) = \beta * \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad [\text{años}]$$

**Ecuación 3.10. Valor medio de la función de Weibull.**

Donde  $\Gamma$  es la función Gamma dada por:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-t} * t^{z-1} dt$$

**Ecuación 3.11. Función Gamma**

Donde para los efectos de este análisis hay que saber 2 de sus propiedades:

$$\Gamma(z + 1) = z * \Gamma(z)$$

Y en el dominio de los naturales:

$$\Gamma(n) = (n - 1)!$$

La probabilidad de falla de un equipo en el año  $i$  modelado por la función de Weibull está dada por la expresión 3.12:

$$P_{falla}(i) = 100 \frac{\alpha}{\beta^\alpha} i^{\alpha-1} e^{-\frac{i^\alpha}{\beta^\alpha}} \quad [\%]$$

**Ecuación 3.12. Probabilidad de falla de un equipo modelado por la función de Weibull.**

Cuando no se cuenta con un registro histórico de fallas, se puede utilizar valores estándares de  $\alpha$  y  $\beta$  para motores eficientes y estándares<sup>9</sup>.

### 3.3 Análisis Predictivo mediante Análisis de Frecuencia de la Corriente y Transformada de Hilbert.

El análisis armónico de la corriente de un motor ha demostrado ser útil en el diagnóstico del estado de diferentes partes constitutivas de motores eléctricos.

La aplicación del análisis de Hilbert es exclusiva de motores de inducción. Esto no representa una dificultad en la Planta de Papeles Cordillera, pues como se dijo, prácticamente la totalidad de los motores del parque son de este tipo.

La hipótesis fundamental de éste análisis es que cada falla en un motor de inducción, aporta una componente única a la corriente de estator, luego, aplicando la Transformada de Hilbert a dicha señal, se obtiene la envolvente de cada una de las componentes, lo que permite separar la componente fundamental (50 Hz). Luego de haber eliminado la componente fundamental, es relativamente sencillo establecer un monitoreo de alguna falla en el motor, o la evolución de una anomalía en éste, comparando el espectro de frecuencias mediante la Transformada de Fourier a las envolventes con las frecuencias características de las fallas a estudiar.

#### 3.3.1 La transformada de Hilbert.

La transformada de Hilbert se define como la convolución de una función  $s(t)$  dada de la siguiente forma:

$$\hat{s}(t) = \mathcal{H}\{s\}(t) = (h * s)(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

**Ecuación 3.13. Definición transformada de Hilbert.**

Donde:

---

<sup>9</sup> PRIEN, "Mecanismos de inversión para el ahorro de energía", 2008.

$$h(t) = \frac{1}{\pi t}$$

Si a una función  $x(t)$  se le aplica la transformada Hilbert, obteniendo  $y(t) = \mathcal{H}(x(t))$ , se define la Función Analítica de  $x(t)$ ,  $z(t)$  como sigue:

$$z(t) = x(t) + jy(t)$$

**Ecuación 3.14. Función Analítica de una señal asociada a la función de Hilbert.**

Donde la Función  $z(t)$  tiene la propiedad de que todas las frecuencias negativas de  $x(t)$  han sido filtradas.

La transformada de Hilbert, además tiene una respuesta en frecuencia dada por la transformada de Fourier:

$$\mathcal{H}(\omega) = \mathcal{F}\{h\}(\omega) = -j * \text{sign}(\omega)$$

**Ecuación 3.15. Transformada de Hilbert dada por la transformada de Fourier**

En términos prácticos, esto quiere decir que si la función primitiva está compuesta por una componente de frecuencia positiva y otra componente de frecuencia negativa:

$$x(t) = x_+(t) + x_-(t) = e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}$$

**Ecuación 3.16. Descomposición de una función en componentes.**

Se tiene que la transformada de Hilbert se obtiene agregando un desfase de  $90^\circ$  a las componentes de frecuencias negativas y agregando un desfase de  $90^\circ$  a las componentes de frecuencia positiva<sup>[2]</sup>:

$$y_+(t) = e^{j\omega_0 t} * e^{-j\frac{\pi}{2}} = y_+(t) = -je^{j\omega_0 t}$$

**Ecuación 3.17. Componente positiva de una función sinusoidal**

$$y_-(t) = e^{-j\omega_0 t} * e^{j\frac{\pi}{2}} = y_-(t) = je^{-j\omega_0 t}$$

**Ecuación 3.18. Componente negativa de una función sinusoidal.**

Y ahora sumando ambas partes se obtiene la transformada de Hilbert de la función primitiva  $x(t)$ :

$$y(t) = -je^{j\omega_0 t} + je^{-j\omega_0 t}$$

**Ecuación 3.19. Transformada Hilbert de una función sinusoidal.**

Luego la función analítica queda:

$$z(t) = x(t) + jy(t) = e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t} + e^{j\omega_0 t} - e^{-j\omega_0 t}$$

**Ecuación 3.20. Función analítica**

$$z(t) = 2e^{j\omega_0 t}$$

Aplicando esta función, a una señal, se logra filtrar completamente las componentes negativas y las positivas han sido aumentadas al doble.

Finalmente, la envolvente de una señal queda determinada por el módulo de la Señal Analítica de dicha señal.

Es decir:

$$E(t) = |z(t)| = |x(t) + jy(t)|$$

**Ecuación 8. Envolvente de una señal, aplicando transformada de Hilbert.**

Con  $y(t)$  la transformada de Hilbert de la señal  $x(t)$ .

### 3.3.2 Envolvente de una señal periódica.

Suponiendo que se quiere analizar la corriente de estator de un motor que presenta fallas en el rotor. En primer lugar, siguiendo la metodología presentada, habría que calcular la envolvente de la señal asociada a la corriente. Este tipo de fallas está caracterizado por la frecuencia  $2sf$ , así que la señal queda denotada como sigue:

$$I_m = A \sin(\omega t) + B \sin[(\omega + 2s\omega)t]$$

Luego se plantea la señal original, para calcular su transformada de Hilbert y luego la Función Analítica;

$$x(t) = A \sin(\omega t) + B \sin[(\omega + 2s\omega)t]$$

Y por lo tanto, con las propiedades indicadas, se obtiene que la transformada de Hilbert de esta señal es:

$$y(t) = -A \cos(\omega t) - B \cos[(\omega + 2s\omega)t]$$

Luego se calcula la señal analítica que queda expresada así:

$$z(t) = -je^{j\omega t} (A + Be^{j2s\omega t})$$

Y sólo basta calcular el módulo de la señal analítica para conocer la envolvente;

$$E(t) = |z(t)| = |A + Be^{j2s\omega t}|$$

Este resultado entrega la siguiente información:

En primer lugar, la componente fundamental no tiene ningún tipo de interferencia.

La componente que está presente corresponde a la frecuencia fundamental dos veces deslizada, que corresponde justamente a la frecuencia de la falla.

Se concluye que la envolvente de esta señal es la suma de la amplitud de la componente fundamental, con el fasor  $B$ , que oscila a la frecuencia de falla.

### 3.3.3 Interpretación de los Espectros de Frecuencia.

El análisis clásico de Fourier permite, mediante la interpretación del espectro de frecuencias, asociar ciertas componentes a fallas en el equipo. Al aplicar este análisis a la envolvente de la señal, es necesario reformular las frecuencias de fallas, pues se ha producido un desplazamiento en ellas. Ahora, dado que la componente fundamental ha sido removida, la interpretación será más sencilla, pues dependerá de menos variables, en particular de la frecuencia de la red.

La variación<sup>[2]</sup> de las frecuencias de acuerdo al análisis de la envolvente se muestra a continuación:

Las componentes de frecuencia para un motor sano:

Análisis clásico de Frecuencia	Análisis de la Envolvente	Causa
$f$	0	Frecuencia de la Red
$nf_r \pm f$	$nf_r$	Discretización campo magnético y ranurado del rotor
$1 \leq n \leq 2$		

Tabla 3.1. Componentes de frecuencia para un motor sano

Componentes de frecuencias para un motor saturado y excéntrico:

Análisis clásico de Frecuencia	Análisis de la Envolvente	Causa
$f$	0	Frecuencia de la Red
$f \pm f_{mec}$	$f_{mec}$	Excentricidad dinámica
$(2n+1)f$	$2nf$	Saturación
$1 \leq n \leq 2$		
$f_r \pm f$	$f_r$	Ranurado de rotor
$f_r \pm f_{mec} \pm f$	$f_r \pm f_{mec}$	Ranurado de rotor y excentricidad dinámica
$f_r \pm (2n+1)f$	$f_r \pm 2nf$	Ranurado de rotor y saturación

Tabla 3.2. Componentes de frecuencia para un motor saturado y excéntrico.

Componentes de frecuencia para motor con barras cortadas:

Análisis clásico de Frecuencia	Análisis de la Envolvente	Causa
f	0	Frecuencia de la Red
$f(1 \pm 2s)$	2sf	Barra rota
$f_r \pm f$	$f_r$	Ranurado de rotor
$f_r \pm f(1 \pm 2s)$	$f_r \pm 2sf$	Ranurado de rotor y barra rota

Tabla 3.3. Componentes de frecuencia para un motor con barras cortadas.

Componentes de frecuencia para un motor con falla en rodamientos:

Análisis clásico de Frecuencia	Análisis de la Envolvente	Causa
f	0	Frecuencia de la Red
$f \pm nf_o$	$nf_o$	Falla en pista externa
$1 \leq n \leq 3$		
$f \pm nf_i$	$nf_i$	Falla en pista interna
$1 \leq n \leq 3$		

Tabla 3.4. Componentes de frecuencia para un motor con falla en rodamientos

Componentes de frecuencia para detección de corto circuito de espiras en flujo axial:

Análisis clásico de Frecuencia	Análisis de la Envolvente	Causa
f	0	Frecuencia de la Red
$[k \pm n(1-s)/p]f$	$[n(1-s)/p]f$ para k=1	Falla en bobinas de estator
$1 \leq n \leq (2p-1)$		
k=1,3	$[k \pm n(1-s)/p]f$ para k=3	

Tabla 3.5. Componentes de frecuencia para detección de corto circuito de espiras en flujo axial.

Donde,

$$f_r = f \frac{2}{p} (1 - s) N_B$$

$$f_{mec} = f \frac{2}{p} (1 - s)$$

Con,

$p$ : número de polos

$f$ : frecuencia fundamental en Hz

$N_B$ : número de barras

$s$ : deslizamiento

Además hay que recordar que:

$$s = \frac{n_s - n_{mec}}{n_s}$$

Con:

$n_s$ : velocidad síncrona en rpm

$n_{mec}$ : velocidad del rotor en rpm

### 3.4 Conclusiones del capítulo

Las mantenencias apropiadas y que se lleven a cabo con una metodología programada, son importantes desde varios puntos de vista; en primer lugar porque se evitan paros de planta inesperados, con sus consiguientes pérdidas de producción, porque se evita un mayor gasto de recurso humano al momento de cambiar repuestos o reemplazar equipos cuando la falla es intempestiva y además, si el monitoreo es remoto, se tiene un mejor manejo de la planta en su totalidad pues hay una vista simultánea del estado de los equipos.

La mantención preventiva o predictiva, arroja ventajas sobre la mantención correctiva. Hay por cierto, una inversión inicial, pero ésta se recupera en la medida que se cumplen los puntos mencionados en el párrafo anterior. Para la mantención predictiva, es necesario contar con un modelo predictivo.

Los modelos más aceptados para la predicción de fallas, son el modelo de fallas asociado a la distribución de Weibull y el análisis de la corriente de salida del motor, en particular, el análisis de la corriente mediante el análisis de frecuencia. Ambos modelos se pueden implementar en un software que opere con datos medidos, o entregados por un registrador conectado al motor.

La aplicación de la distribución de Weibull como modelo de fallas, implica la necesidad de un registro histórico de fallas. Sin embargo, hay datos para sus parámetros que son estándares y que se pueden adoptar para motores estándares como eficientes.

El análisis de corriente por medio de la transformada de Fourier, permite un monitoreo que es relativamente sencillo de implementar en un software.

El análisis de la envolvente, por su parte, permite una identificación más rápida de las componentes de frecuencia que se asocian a fallas. Esto porque la componente fundamental deja de tener representación en el estudio.

El espectro de frecuencias de una envolvente pretende ser entonces un modelo que permite monitorear e identificar fallas en un equipo sin tener que detener equipos que están en funcionamiento en una planta.

Finalmente, se debe indicar que hay dispositivos que se ofrecen en el mercado que utilizan estos métodos o variantes, para el monitoreo remoto del estado de motores, que se conectan al motor o al VDF. Este es el caso por ejemplo, del MCM (Monitor Condition Motor)

## **4. Análisis Predictivo Utilizando Transformada de Hilbert.**

Este apartado muestra el grueso de este trabajo en el sentido de que evidencia con datos reales, tomados en la Planta de Papeles Cordillera, la aplicación del análisis armónico y en particular, la aplicación de la transformada de Hilbert como un método útil de diagnóstico del estado de partes constitutivas de un motor de inducción.

La hipótesis fundamental de este análisis, como se explicó en la parte teórica de este trabajo en el capítulo anterior, señala que al aplicar la transformada de Hilbert de una señal de corriente, se puede obtener su envolvente, la que permite prescindir de la frecuencia fundamental en el análisis, lo que facilita enormemente la identificación de componentes de falla y su frecuencia, una vez que se ha trasladado las componentes de tiempo al espectro de Fourier.

El procedimiento por su parte consiste en tres pasos básicos:

1. Selección de muestra para ser sometida a análisis. La selección va a estar supeditada por un lado a equipos que sean accesibles físicamente, y por otra parte al involucramiento de personal técnico que indique según su criterio, cuáles son los equipos que eventualmente tendrían algún problema y están próximos a ser sustituidos, o que de hecho están en el calendario de revisión o sustitución.
2. Toma de datos en planta de Papeles Cordillera. Esta toma de datos se refiere al registro mediante un equipo registrador de señales, de la corriente de estator de los motores seleccionados en el paso anterior.
3. Análisis de datos. En esta parte, se procederá a graficar y tabular las señales, seleccionar los parámetros óptimos de análisis y aplicar transformada de Hilbert. Luego de eso, se trasladan los vectores al espacio de la frecuencia con la transformada de Fourier y se identifican las frecuencias características de fallas, teniendo como base de datos la tabulación de fallas estipuladas.

### **4.1 Selección de la muestra.**

Se seleccionó 8 motores. Con el fin de tener una muestra variada se involucraron motores dentro de un rango amplio de potencia, tomando desde 55 kW hasta 500 kW. Con la asistencia de personal especializado de la Compañía, se seleccionaron los equipos indicados en la tabla 4.1

### **4.2 Toma de datos.**

Parte primordial de la toma de datos fue el arriendo por parte de Papeles Cordillera de un equipo analizador de señales. Luego de ello se contó con la ayuda de personal calificado de la compañía para operar el equipo y medir la corriente en régimen permanente en los motores seleccionados. Parte de los datos se muestran en los anexos.



Nombre y función	(RPM) Nom.	Potenc (kW)	Voltaje Nom (V)	Corriente Nom (A)	Cos (phi)
Bomba alimentación fraccionador Irio	993	400	690	423	0,82
Bomba. Vacío filtro de las prensas	1481	450	690	453,0	0,86
Bomba de Vacío CL2001	1480	55	690	56,8	0,86
Bomba vacío 904S2 Tela Reverso	1481	500	690	490,0	0,88
Bomba. Vacío Rodillo guía paño prensa 1 y 2	1481	450	690	453	0,87
Bomba 12 Alimentación 1ª Etapa Cleaners	1488	315	690	315,9	0,87
Contaminex CM30/31	1488	110	690	111,3	0,86
Bomba descarga torre fibra corta	1475	55	690	57,0	0,84

Tabla 4.1. Muestra de motores que serán sometidos a análisis de frecuencia.

#### 4.2.1 Equipo utilizado.

El equipo utilizado se denomina POWER PAD 8335.



Ilustración 11. Equipo registrador de señales.

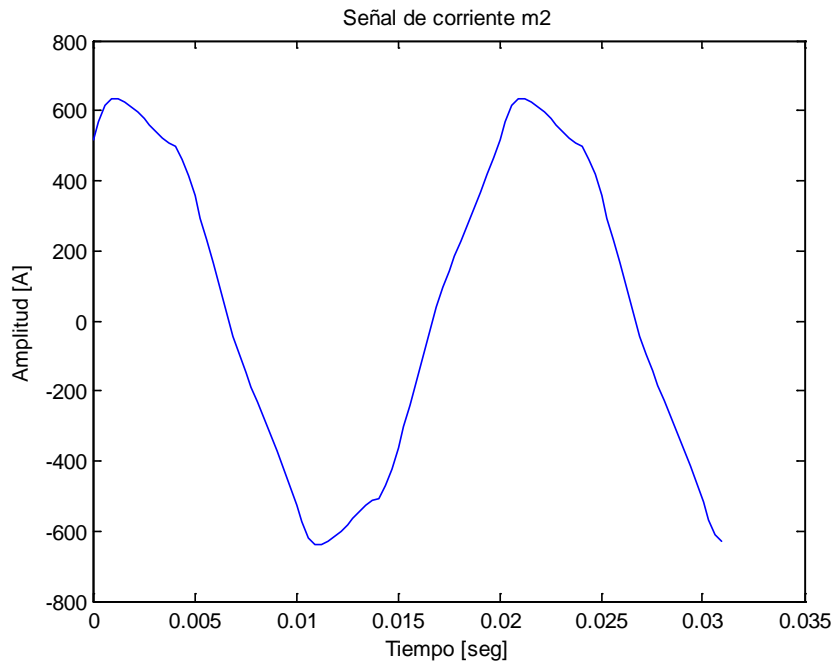
Las características principales del equipo, para los fines de esta medición son en primer lugar que permite medir hasta 3200 muestras por segundo. Además, tiene una memoria interna de 2 GB lo que permitía medir, hasta llenar dicha memoria, más de 65000 muestras. Se hicieron mediciones en una fase.

#### 4.3 Aplicación de Transformada de Hilbert y Análisis de Fourier.

Se tomó más de 65000 muestras para cada uno de los motores. Cada muestra está tomada cada intervalos de 0,0003125 segundos, es decir, 312,5  $\mu$ seg. Si se toma en cuenta que los ciclos fundamentales son de 50 Hz para la señal de corriente de estator de los motores con pequeñas variaciones en su cercanía, se puede calcular que con 64 muestras se tiene íntegramente un ciclo de la señal.

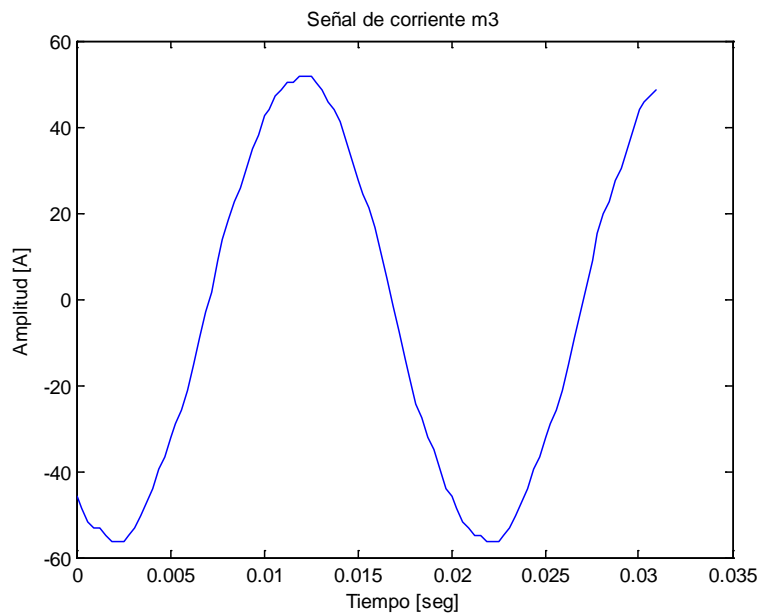
Los motores, tal como se muestra en la tabla 4.6, fueron nominados m1, m2, \_\_\_\_\_, m8 durante el resto del trabajo.

El gráfico siguiente muestra la señal de corriente del motor m2, con 100 muestras, a una tasa de muestreo de 312,5  $\mu$ seg, percibiéndose un poco más de 1 ciclo para la componente fundamental.



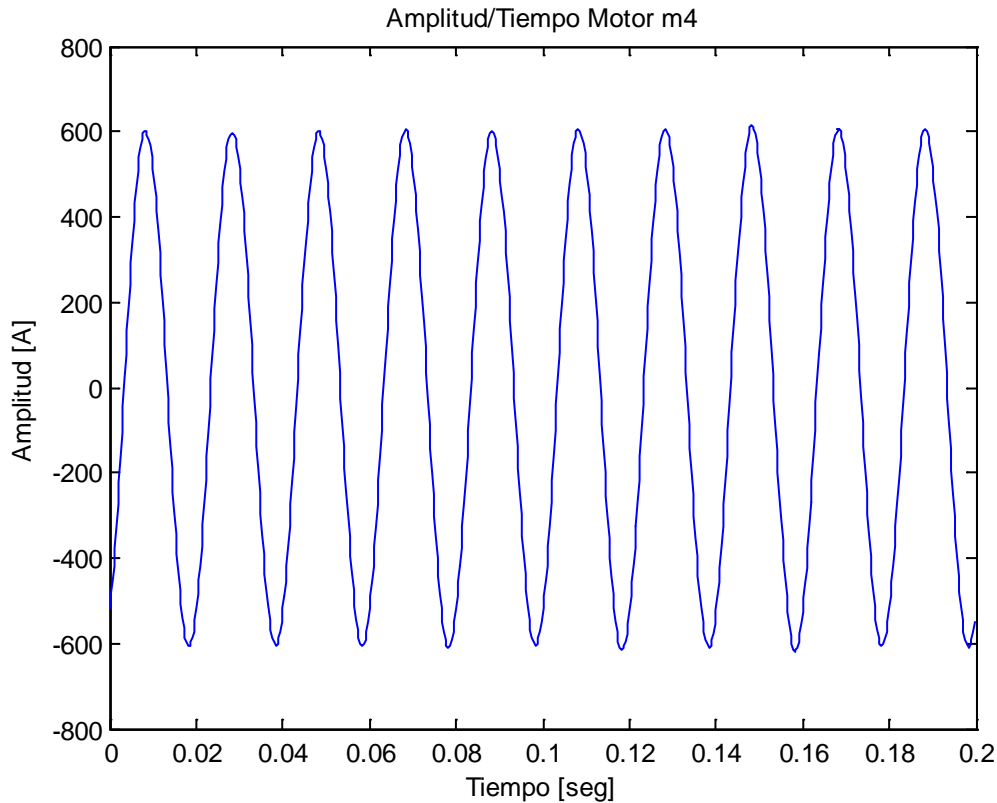
**Ilustración 12. Amplitud corriente para el motor m2 de la muestra**

La amplitud de corriente de los motores de inducción varía en un rango de 56,8 A a 490 A; para el caso del motor m3, cuya corriente nominal es de 56,8 se muestra su espectro temporal para 100 muestras.



**Ilustración 13. Amplitud corriente para el motor m3 de la muestra**

A medida que se aumentan las muestras, se puede apreciar un mayor número de ciclos de red. Como ya se sabe que para, por ejemplo, 640 muestras se tienen 10 ciclos se graficará para ese número de datos. Esto se muestra en la Ilustración 4.4.



**Ilustración 14. Amplitud de la corriente vs tiempo para motor m4.**

El planteamiento explicado en el marco teórico, indica que se analiza el espectro de frecuencia a la señal de corriente de estator de un motor de inducción. Esto es lo que se hará a continuación para las señales mostradas anteriormente, mediante la utilización de la Transformada de Fourier y luego la Transformada de Hilbert.

Al respecto conviene tener en cuenta ciertas consideraciones previas:

Los vectores de corriente fueron muestreados a un tiempo de muestreo de 312,5 microsegundos. Este tiempo se puede aumentar intercalando las señales pero no se puede disminuir.

La tasa de muestreo por tanto es el inverso de dicho número. La respuesta en frecuencia va a estar dada por tantos puntos como muestras se tomen, el espacio entre cada coeficiente de la transformada de Fourier se denomina Resolución de Frecuencia y está dado por el inverso del tiempo total de la muestra.

Es decir, se tienen las siguientes variables:

$$L = \text{número de muestras}$$

$$T = \text{tiempo entre cada muestra}$$

$$F_s = \frac{1}{T} = \text{Frecuencia de muestreo}$$

$$D = T * L = \text{tiempo total de la muestra}$$

$$f_0 = \frac{1}{D} = \text{resolución de frecuencia}$$

$$f_c = \frac{D}{0,02} = \text{ciclos de red}$$

Falta aún definir un par de variables. Dado que la transformada de Fourier es una función desde el espacio del tiempo al espacio de la frecuencia, falta definir el recorrido de dicha función. El dominio por cierto, está dado por los datos medidos, corrientes de estator de los motores de inducción. El recorrido está dado por el rango de frecuencias entre la frecuencia máxima y mínima.

Para saber la frecuencia máxima detectable es necesario recurrir al teorema de Nyquist, el cual indica que para detectar una frecuencia máxima B, es necesario muestrear a una frecuencia 2B. Por tanto, en este caso, dado que se elige una frecuencia de muestreo  $F_s$ , limitada a una máximo de 3200 Hz, la frecuencia máxima detectable será:

$$F_{max} = \frac{F_s}{2}$$

Por otra parte, la frecuencia mínima detectable, estará dada por el tiempo de muestreo. Para detectar una señal periódica, es necesario saber que es periódica. Detectando 2 de sus períodos al menos, se puede caracterizar la función como tal. Por ello, la frecuencia mínima detectable será:

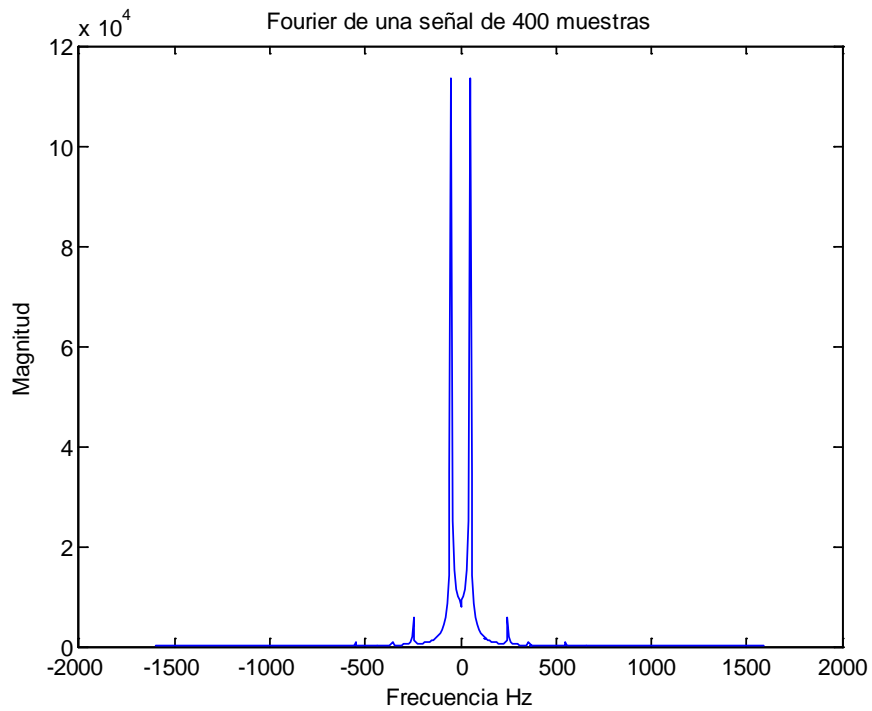
$$F_{min} = \frac{D}{2}$$

Si la resolución de frecuencia suficiente es de 8 Hz, se fija que el tiempo de la muestra debe ser 0,125 seg. En 1 seg se tienen 3200 muestras, si se escogen todas. Evidentemente que pueden escogerse de tal forma de aumentar el tiempo entre cada muestra. Las variables para este ejemplo quedan como se ve en la tabla 4.2:

Variable	Designación	Valor
Número de muestras	L	400
Tiempo entre cada muestra [seg]	T	0,0003125
Frecuencia de muestreo [Hz]	$F_s$	3200
Duración de la muestra [seg]	D	0,125
Resolución de frecuencia [Hz]	$f_0$	8
Frecuencia máxima detectable [Hz]	$F_{max}$	1600
Frecuencia mínima detectable [Hz]	$F_{min}$	0,0625
Ciclos de Red	$f_c$	6,25

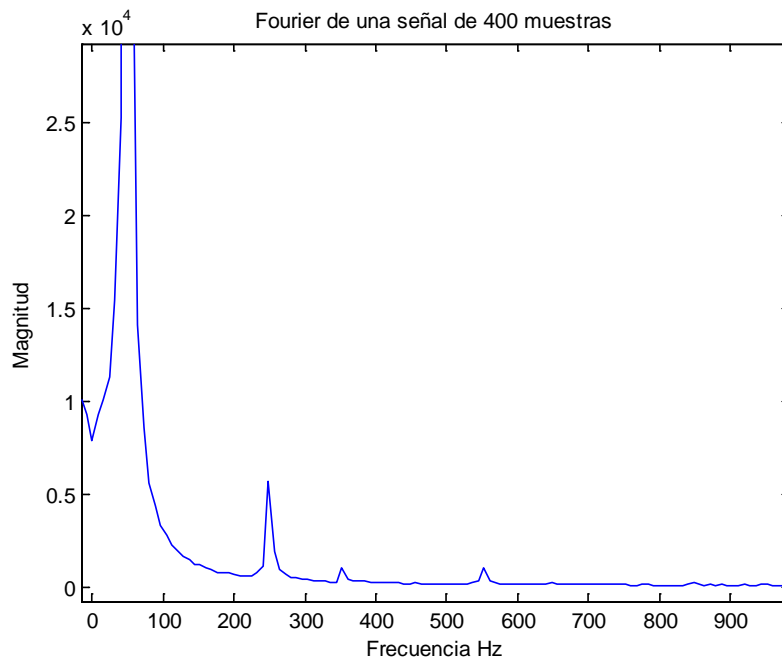
Tabla 4.2. Variables que caracterizan la señal en tiempo y frecuencia.

Para las variables dadas en la tabla 4.2, donde variables en verde son independientes y las en celeste son dependientes, tiene un espectro de frecuencias como se muestra en la Ilustración 4.5:



**Ilustración 15. Respuesta en frecuencia mediante Fourier.**

Del análisis de la respuesta en frecuencia de la señal se puede apreciar con notoriedad la componente de quinta armónica, aparte de la componente fundamental. También se ven las componentes de 7<sup>o</sup> y 11<sup>o</sup> armónica.



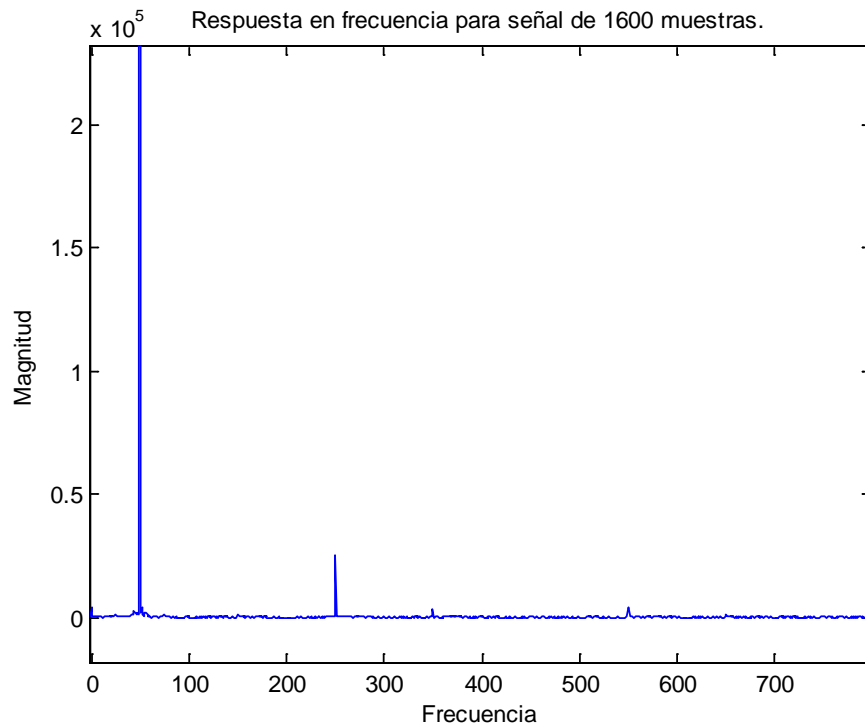
**Ilustración 16. Respuesta en frecuencia, zoom de la Ilustración 4.5**

Haciendo un zoom del gráfico anterior se aprecian las componentes en 250 Hz, 350 Hz y 550 Hz, con mayor claridad.

Es probable que con una elección distinta de las variables se obtenga mayor información. Para ello se tomará en primer lugar una resolución de frecuencia de 1 Hz, con lo cual el tiempo de muestra queda fijo en 1 seg.

Variable	Designación	Valor
Número de muestras	L	3200
Tiempo entre cada muestra [seg]	T	0,0003125
Frecuencia de muestreo [Hz]	Fs	3200
Duración de la muestra [seg]	D	1
Resolución de frecuencia [Hz]	fo	1
Frecuencia máxima detectable [Hz]	Fmax	1600
Frecuencia mínima detectable [Hz]	Fmin	0,5
Ciclos de Red	fc	50

**Tabla 4.3. Variables para la respuesta en frecuencia, de una señal de 3200 muestras**



**Ilustración 17. Fourier de la señal de 1600 muestras.**

Se observan las mismas componentes de frecuencia que en la Ilustración anterior, información a partir de la cual se realizarán los análisis de fallas de ahora en adelante.

En rigor, la información proporcionada es la misma en ambas gráficas, sin embargo, es posible distinguir las componentes de armónicas de forma más precisa en el segundo ejemplo.

En este punto es posible fijar ciertas variables óptimas para el análisis de Hilbert. En primer lugar, de los ejemplos mostrados anteriormente, se concluye que a mayor frecuencia de muestreo, hay mayor frecuencia máxima detectable. Además, la resolución de frecuencia ya se indicó que depende solamente de la duración de la muestra. Para la continuación de este trabajo se establecerá como una resolución suficiente 0,25 Hz. Con esto, el tiempo total de la muestra para una frecuencia de muestreo de 3200 muestras por segundo es de 4 segundos. El resto de las variables queda como se muestra en la tabla 4.4.

Variable	Designación	Valor
Número de muestras	L	12800
Tiempo entre cada muestra [seg]	T	0,0003125
Frecuencia de muestreo [Hz]	Fs	3200
Duración de la muestra [seg]	D	4
Resolución de frecuencia [Hz]	fo	0,25
Frecuencia máxima detectable [Hz]	Fmax	1600
Frecuencia mínima detectable [Hz]	Fmin	2
Ciclos de Red	fc	200

**Tabla 4.4. Variables de la señal analizada para resolución de frecuencia de 0,25 Hz**

Es importante notar que en este intervalo de tiempo se analizan unos 200 ciclos de red.

Una vez que ya están elegidos los parámetros que permiten un análisis óptimo, es necesario volver a mirar la frecuencia para cada falla y calcularlas. Afortunadamente el deslizamiento se puede calcular con facilidad, pues la información con respecto a la velocidad nominal es proporcionada por el fabricante y con esto se calculan los polos y posteriormente la velocidad síncrona. Tal información está contenida en las tablas de los anexos. Se sabe que:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

La velocidad síncrona satisface que:

$$n_s = \frac{120 f}{p}$$

Con:

$n_r$ : velocidad del rotor en rpm

$f$ : frecuencia de la red en Hz

$p$ : número de polos del motor de inducción.

Con los parámetros fijados se tiene la tabla 4.5:

Nombre y función	(RPM) Nom.	Polos	$\omega_s$	$\omega_r$	s
Bomba alimentación fraccionador 1rio	993	6	1000	894	0,1060
Bomba. Vacío filtro de las prensas	1481	4	1500	1481	0,0127
Bomba de Vacío CL2001	1480	4	1500	1480	0,0133
Bomba vacío 904S2 Tela Reverso	1481	4	1500	1481	0,0127
Bomba. Vacío Rodillo guía paño prensa 1 y 2	1481	4	1500	1481	0,0127
Bomba 12 Alimentación 1ª Etapa Cleaners	1488	4	1500	1488	0,0080
Contaminex CM30/31	1488	4	1500	1488	0,0080
Bomba descarga torre fibra corta	1475	4	1500	1346	0,1027

Tabla 4.5. Parámetros de operación de los motores muestreados.

Llegado este punto falta algo muy importante. Las frecuencias de falla que se busca encontrar deben calcularse para cada motor, aun cuando sus parámetros de operación son similares para algunos de ellos.

Se mostrará además que, dado que no se depende de la frecuencia fundamental para el caso de la respuesta de frecuencia de la envolvente, la identificación de la eventual frecuencia de falla es más sencillo y de fácil observación en el espectro.



Tomando como base las frecuencias tabuladas en el apartado de interpretación de frecuencias, y con la ayuda de los datos mostrados en la tabla 4.5, las frecuencias de falla quedan como se muestra en la tabla 4.6.

Denominación Motor	Frecuencia de la red		Excentricidad Dinámica		Saturación	
	Clásico [Hz]	Envolvente [Hz]	Clásico [Hz]	Envolvente [Hz]	Clásico [Hz]	Envolvente [Hz]
<b>m1</b>	50	0	35,1 64,9	14,9	150,250,350	100,200,300
<b>m2</b>	50	0	25,3 74,7	24,7	150,250,350	100,200,300
<b>m3</b>	50	0	25,3 74,7	24,7	150,250,350	100,200,300
<b>m4</b>	50	0	25,3 74,7	24,7	150,250,350	100,200,300
<b>m5</b>	50	0	25,3 74,7	24,7	150,250,350	100,200,300
<b>m6</b>	50	0	25,2 74,8	24,8	150,250,350	100,200,300
<b>m7</b>	50	0	25,2 74,8	24,8	150,250,350	100,200,300
<b>m8</b>	50	0	27,6 72,4	22,4	150,250,350	100,200,300

Tabla 4.6. Frecuencia de falla análisis clásico y de envolvente.

Denominación Motor	Ranurado de rotor		Ranurado de rotor y Excentricidad Dinámica		Ranurado de rotor y Saturación	
	Clásico [Hz]	Envolvente [Hz]	Clásico [Hz]	Envolvente [Hz]	Clásico [Hz]	Envolvente [Hz]
m1	308 408	358	423 323 393 293	343 373	108 208 8 508	158 258 458 558
<b>m2</b>	542 642	592	667 567 618 518	568 617	342 442 242 742	392 492 292 792
<b>m3</b>	542 642	592	667 567 618 518	569 617	342 442 242 742	392 492 292 792
<b>m4</b>	542 642	592	667 567 618 518	570 617	342 442 242 742	392 492 292 792
<b>m5</b>	542 642	592	667 567 618 518	571 617	342 442 242 742	392 492 292 792
<b>m6</b>	545 645	595	670 570 620 520	570 620	345 445 245 745	395 495 295 795
<b>m7</b>	545 645	595	670 570 620 520	570 620	345 445 245 745	395 495 295 795
<b>m8</b>	488 588	538	611 511 566 466	516 561	288 388 188 688	338 438 238 738

Tabla 4.7. Frecuencias características de falla análisis clásico y envolvente.

Denominación Motor	Barra Cortada		Ranurado de rotor y Barra Cortada	
	Clásico [Hz]	Envolvente [Hz]	Clásico [Hz]	Envolvente [Hz]
<b>m1</b>	39,4 60,6	10,6	297 318 397 418	368 347
<b>m2</b>	48,7 51,3	1,3	541 544 641 644	594 591
<b>m3</b>	48,7 51,3	1,3	541 544 641 644	594 591
<b>m4</b>	48,7 51,3	1,3	541 544 641 644	594 591
<b>m5</b>	48,7 51,3	1,3	541 544 641 644	594 591
<b>m6</b>	49,2 50,8	0,8	544 546 644 646	596 594
<b>m7</b>	49,2 50,9	0,8	544 546 644 646	596 594
<b>m8</b>	39,7 60,3	10,3	478 499 578 599	549 528

Tabla 4.8. Frecuencias características de falla análisis clásico y envolvente.

Ahora que ya se tienen las frecuencias características de falla tanto para el análisis clásico de Fourier como para la respuesta en frecuencia de la envolvente de la señal de corriente, se verá qué sucede con las muestras tomadas y haciendo el análisis con las variables seleccionadas anteriormente. Para la muestra m2<sup>10</sup> se tiene el siguiente espectro de Fourier:

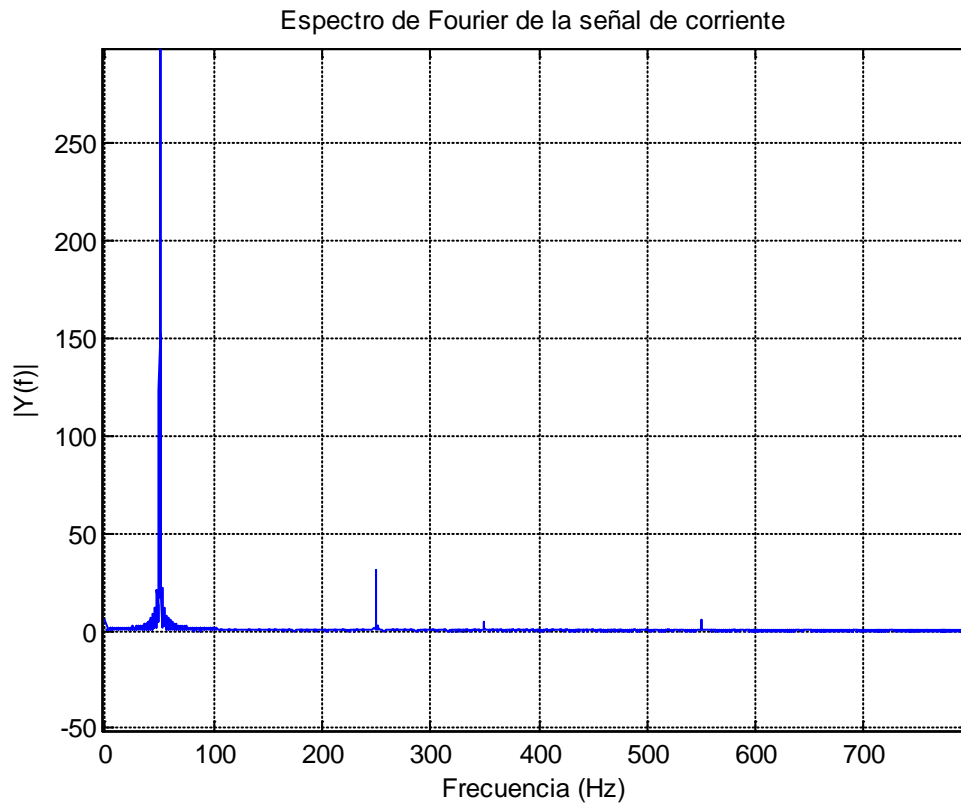
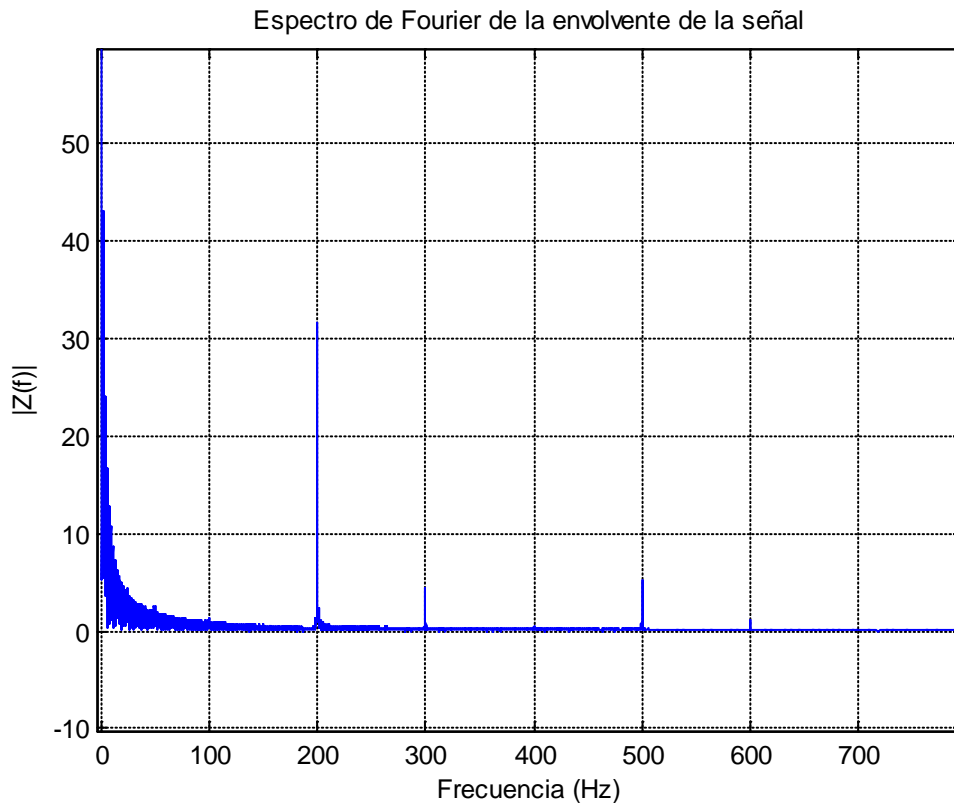


Ilustración 18. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor m2

<sup>10</sup> Las muestras se numeraron m1\_\_\_m8 pero no se utilizó la muestra m1 por presentar una senoide extraña para su tipo. Prefirió dejarse fuera del análisis para evitar realizar un análisis errado de las componentes de frecuencia.

Aparecen las componentes de armónicos, que muestran la saturación del equipo. Se aprecia que la saturación corresponde a la presencia de armónicos 3, 5 y 11. Se mostrará que dichas componentes de frecuencias, al aplicar la transformada de Fourier a la envolvente de la misma señal Ilustración con mayor claridad y ya no dependen de la fundamental.

Veamos qué sucede:

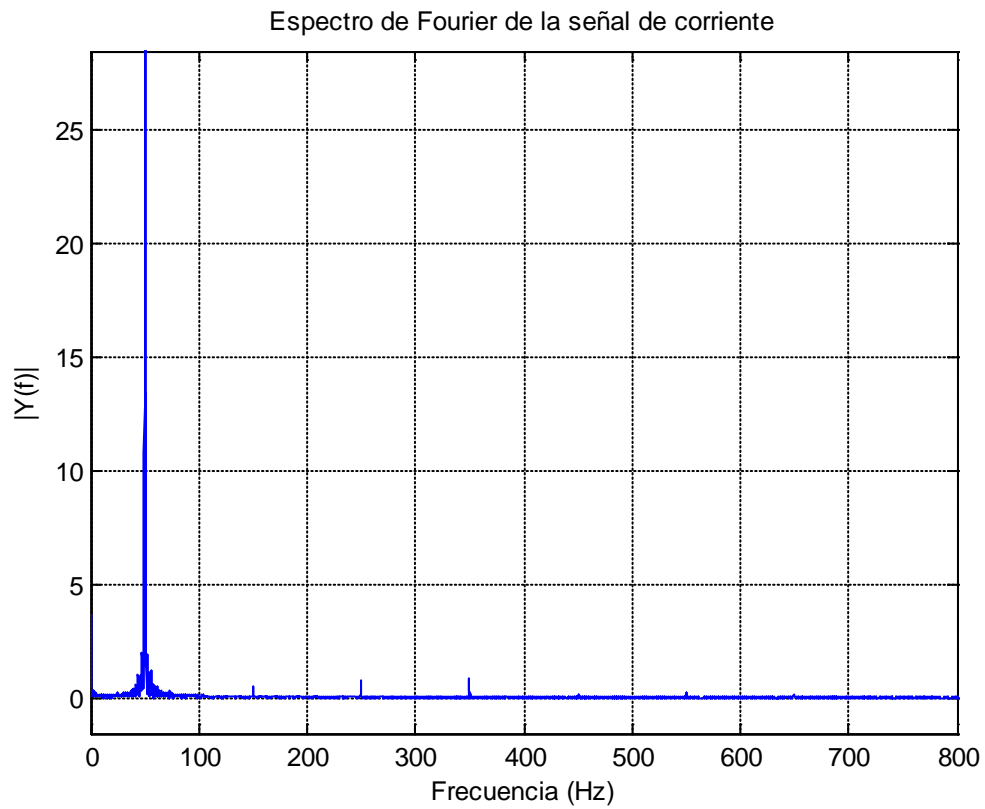


**Ilustración 19. Respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m2.**

Al observar este primer análisis armónico, quedan de manifiesto dos cosas; primero, que el motor m2 presenta saturación con componentes de 5°, 7° y 11° armónica y, que efectivamente ya no hay dependencia de la componente fundamental. El porcentaje de armónicos, si bien no es un tema de este trabajo, es factible de calcular.

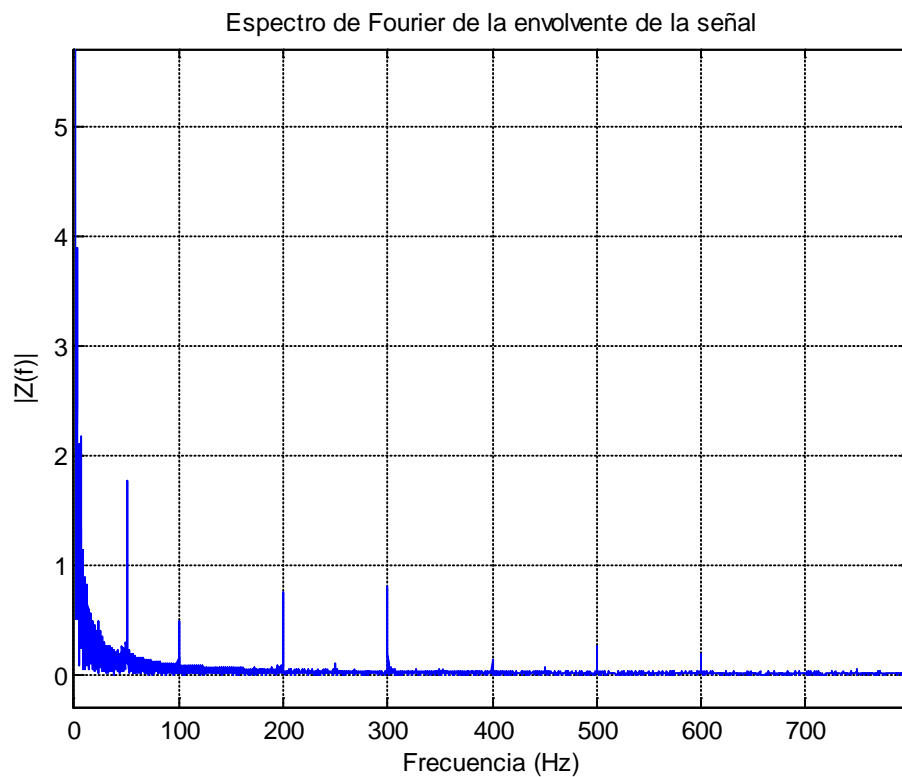
Por otra parte, las componentes de frecuencia relacionadas con otros tipos de falla no están presentes en este motor, descartándose alguna de las fallas descritas en el capítulo precedente.

Continuando con el análisis, se muestra el espectro de Fourier para la señal y para la envolvente de la muestra m3:



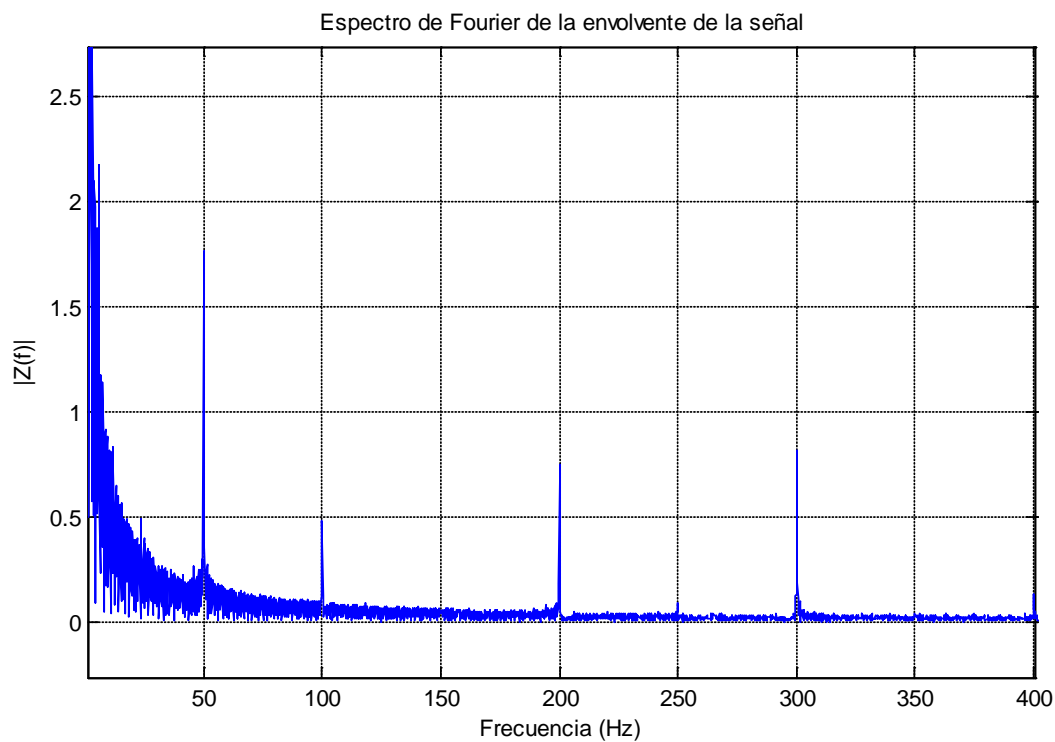
**Ilustración 20. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor m3**

Y se mostrará inmediatamente la respuesta en frecuencia de la envolvente para que el análisis en paralelo muestre rápidamente que la eliminación de la componente fundamental del análisis facilita la lectura de frecuencias de falla.



**Ilustración 21. Respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m3**

Haciendo un zoom de este último gráfico se encuentran las componentes de frecuencia de falla.



**Ilustración 22. Zoom respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m3**

Lo primero que hay que decir en este caso, es que hay presencia de falla de más de un tipo. Hay saturación del equipo como lo evidencian las componentes de 100, 200 y 300 Hz. La componente de 50 Hz podría dar a conocer que no hay un desplazamiento total de la componente fundamental. La componente de 20 Hz corresponde a la excentricidad dinámica de la tabla de frecuencias de fallas. Es apenas perceptible por tanto podría afirmarse que el fenómeno es incipiente.

Al respecto es importante destacar que la gravedad de la falla es directamente proporcional a la magnitud de la componente de frecuencia <sup>[6]</sup>. De hecho, en el estudio citado, se constata que la dependencia es además de la intensidad de la rotura de la barra, para esa falla en particular, con el número de barras.

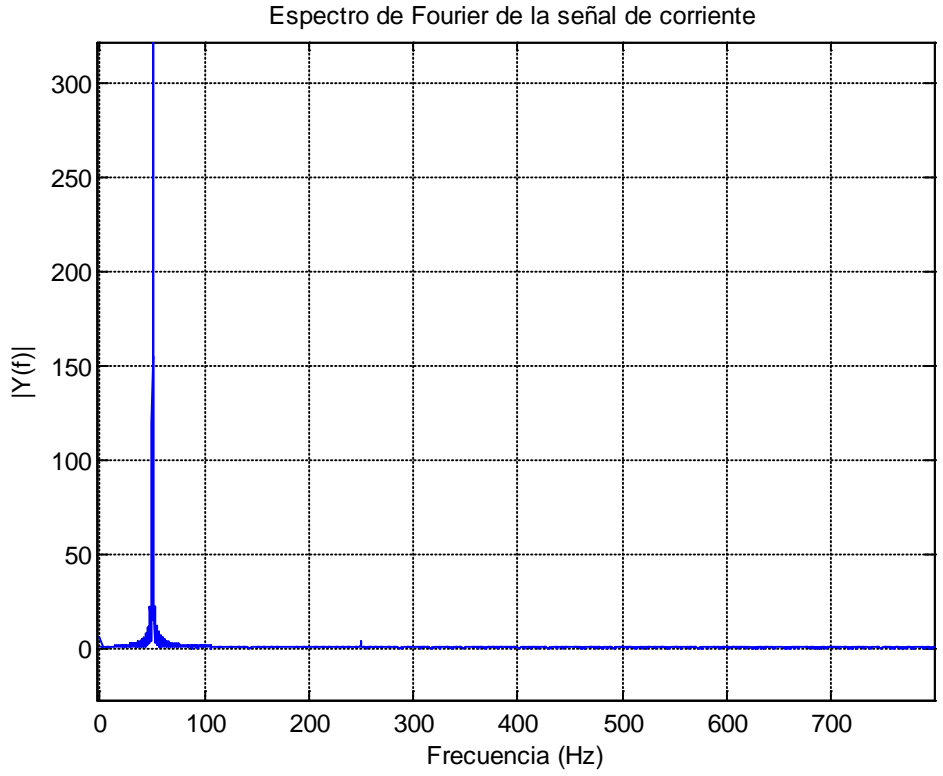
Este último efecto se grafica en la Ilustración 4.13.



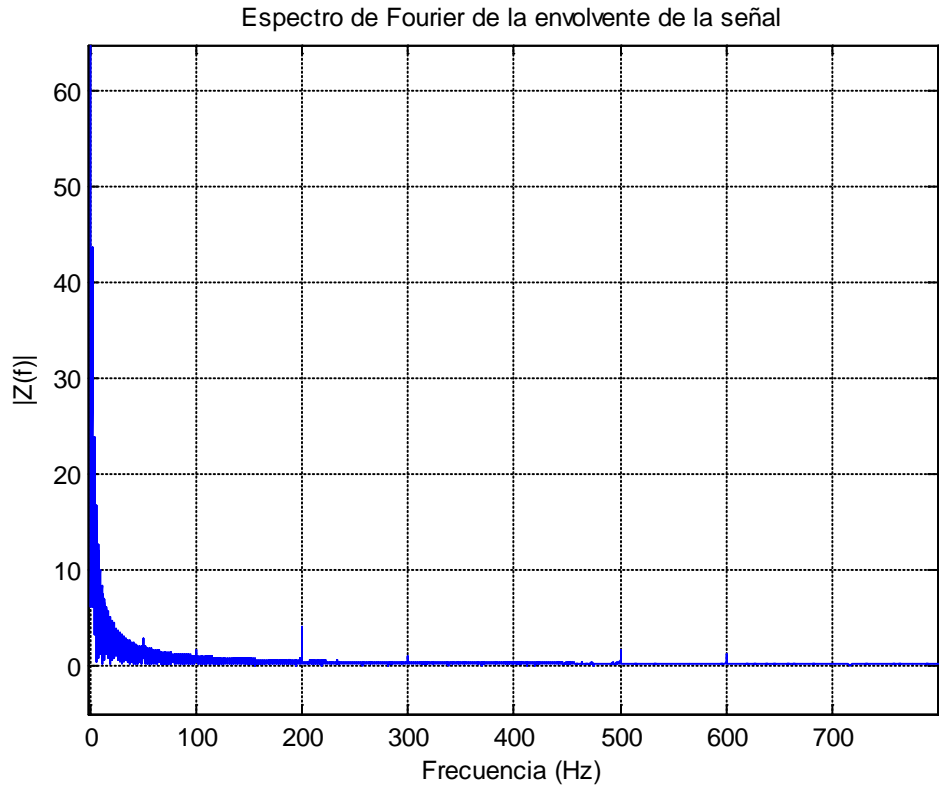
Ilustración 23. Zoom respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m3

Volviendo al análisis de falla del motor m3, para la componente cercana a cero, entre unos 2 y 5 Hz, la frecuencia característica más cercana es la que se indica en la tabla 4.8 como 1,3 Hz correspondiente justamente a barra rota. La diferencia entre ambas frecuencias se explica porque al calcular el deslizamiento se tomó la velocidad de operación registrada en una instancia distinta del registro de corriente, y por tanto no necesariamente coinciden. De haber una variación, esto se reflejaría en el deslizamiento, cambiando levemente la frecuencia a la cual se manifiesta la componente relacionada con la rotura de barra.

A continuación se presentará la respuesta en frecuencia para el motor m4:



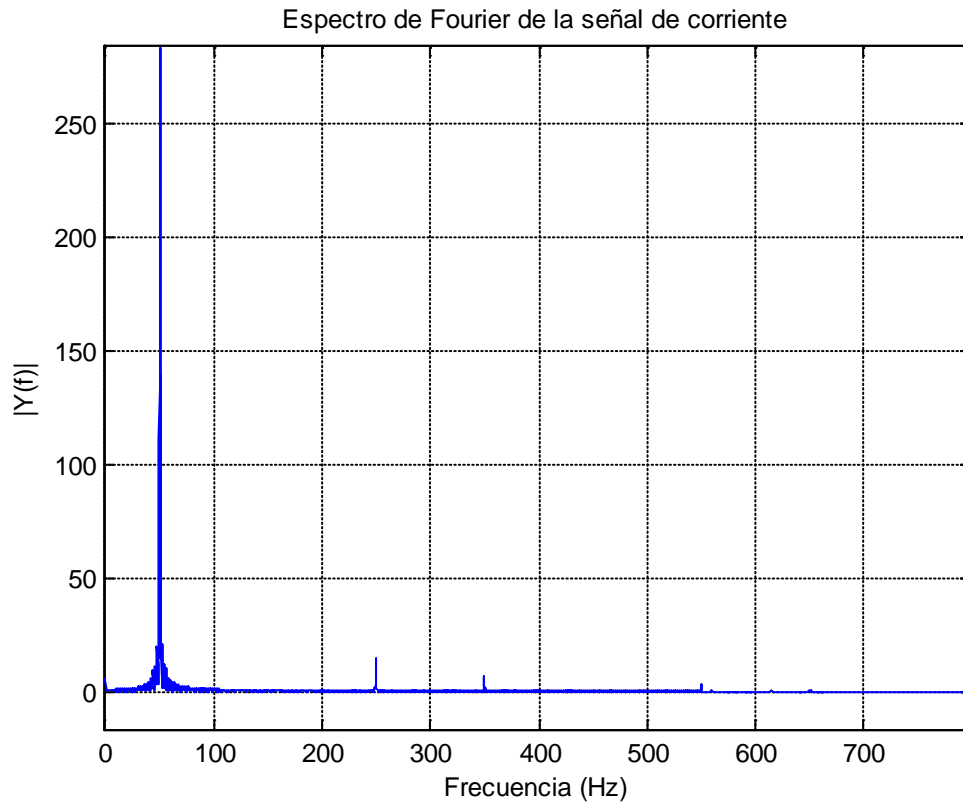
**Ilustración 4.24.** Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor m4.



**Ilustración 25.** Respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m4

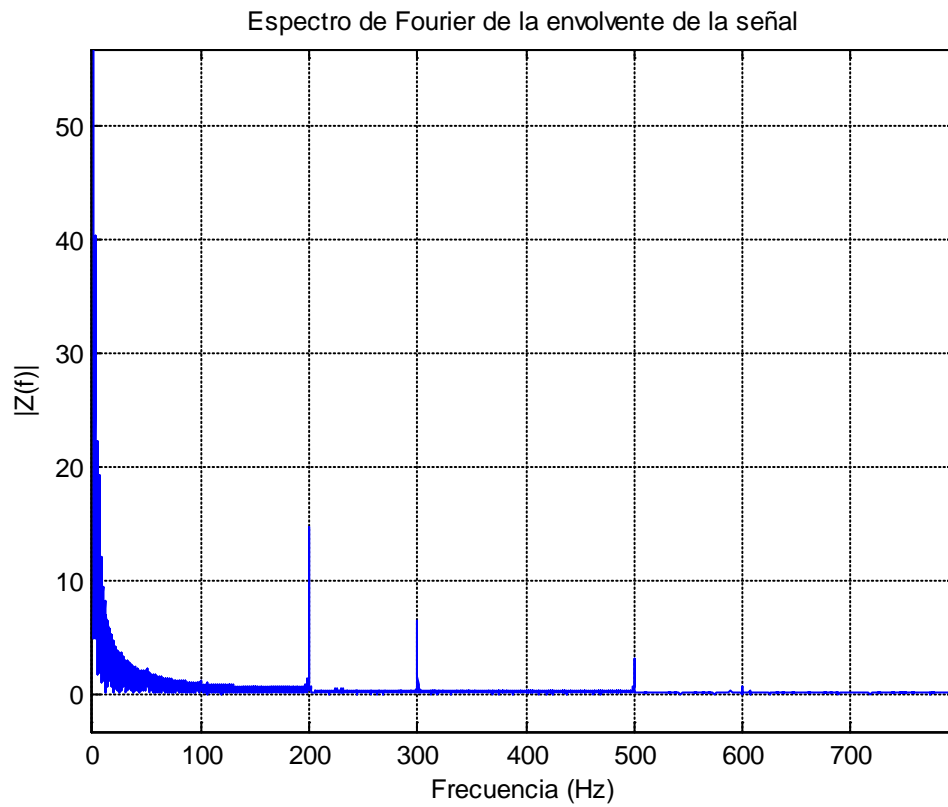
En este caso no hay evidencias de falla. La saturación es apenas perceptible para las componentes de 7° y 11° armónicas. Sólo la componente de 5° se aprecia con algo de claridad. La componente de 3° armónica no existe en este caso. Se habla de un motor sano, en perfecto funcionamiento.

Se someterá entonces a análisis el motor m5:



**Ilustración 26. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor m5**



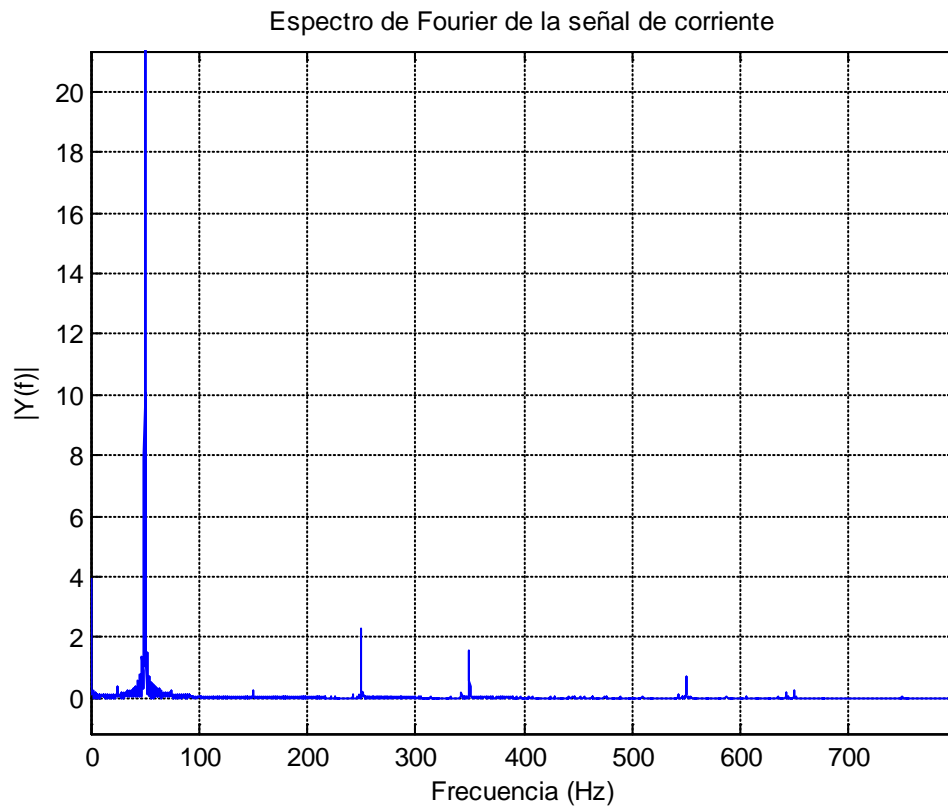


**Ilustración 27. Respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m5.**

La magnitud de las componentes en 200, 300 y 500 Hz es comparativamente mayor que el caso anterior. Sin embargo, más allá de la saturación del equipo, no hay fallas mecánicas.

Se logra apreciar una componente pequeña en 600 Hz sin embargo se subestimaré por su magnitud.

Se presentara ahora la respuesta en frecuencia para el motor m6:



**Ilustración 28. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor m6.**

Es fácil darse cuenta que este es el equipo que ha presentado mayor presencia de componentes en su respuesta de frecuencia;

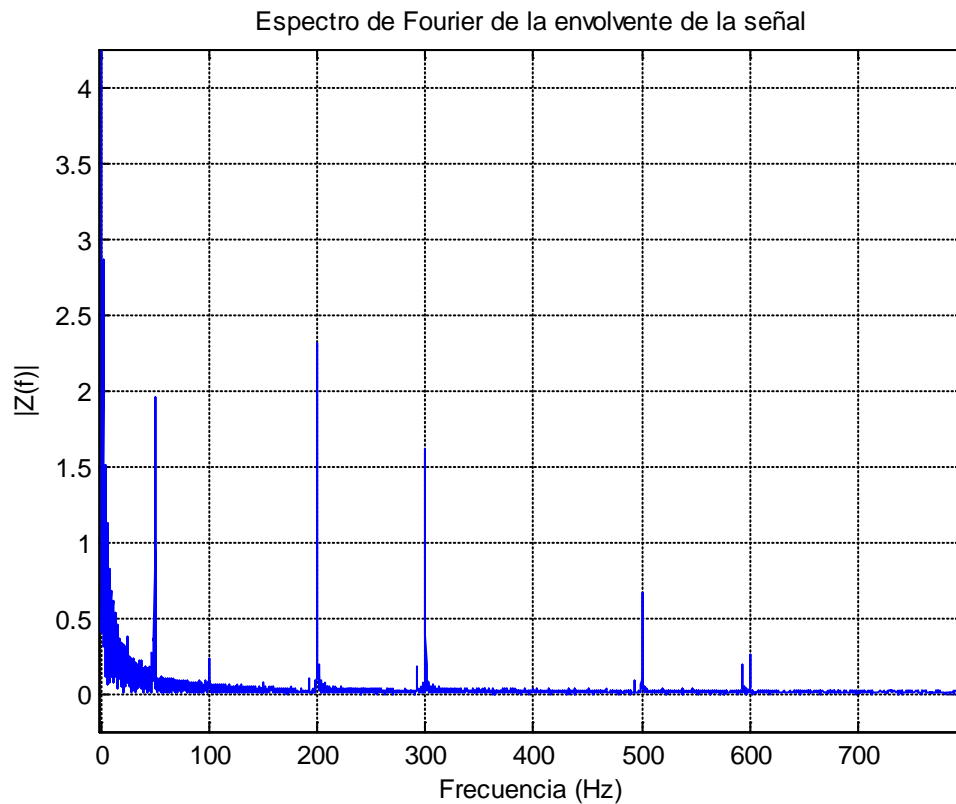
Frecuencia 25,2 y 74,8 Hz correspondiente a excentricidad dinámica

Frecuencias 150, 250 y 350 Hz correspondiente a saturación.

Frecuencias 545, 645 Hz correspondiente a ranurado de rotor.

Frecuencias 245, 345, 445 y 745 Hz correspondiente a Ranurado de rotor y saturación. Situación naturalmente esperable por las frecuencias anteriores.

En la respuesta de Fourier de la envolvente se verá cómo se manifiestan las componentes respectivas que ya no dependen de la fundamental.



**Ilustración 29. Respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m6.**

Las componentes se presentan en las siguientes frecuencias:

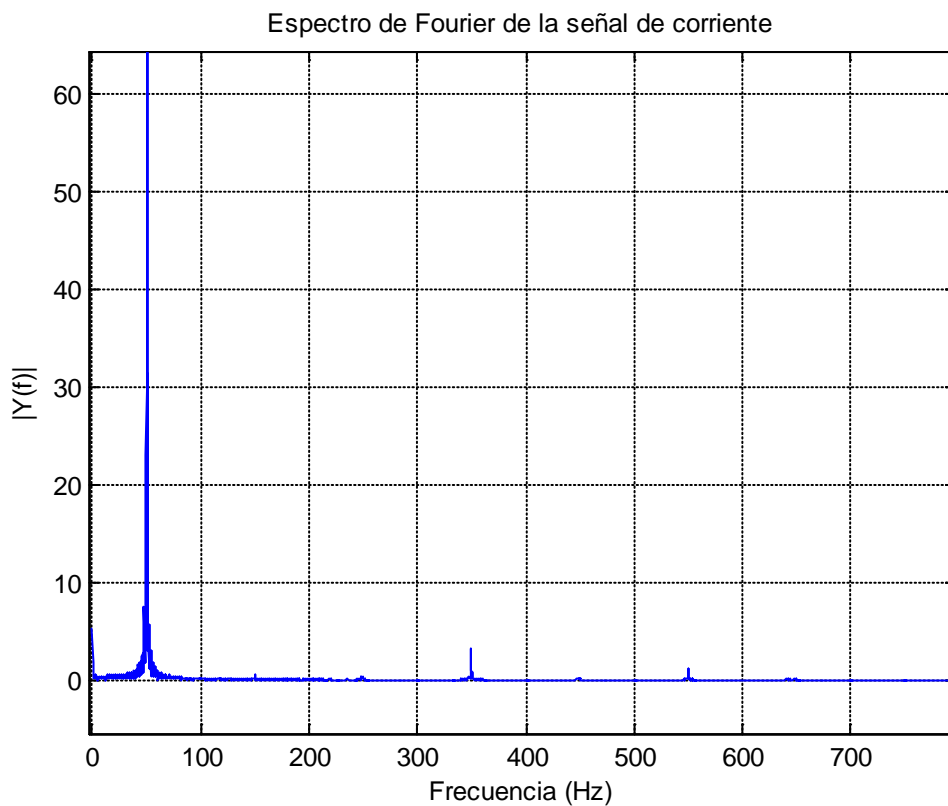
Frecuencia 24,8 Hz correspondiente a excentricidad dinámica.

Frecuencia 100, 200 y 300 Hz correspondiente a saturación.

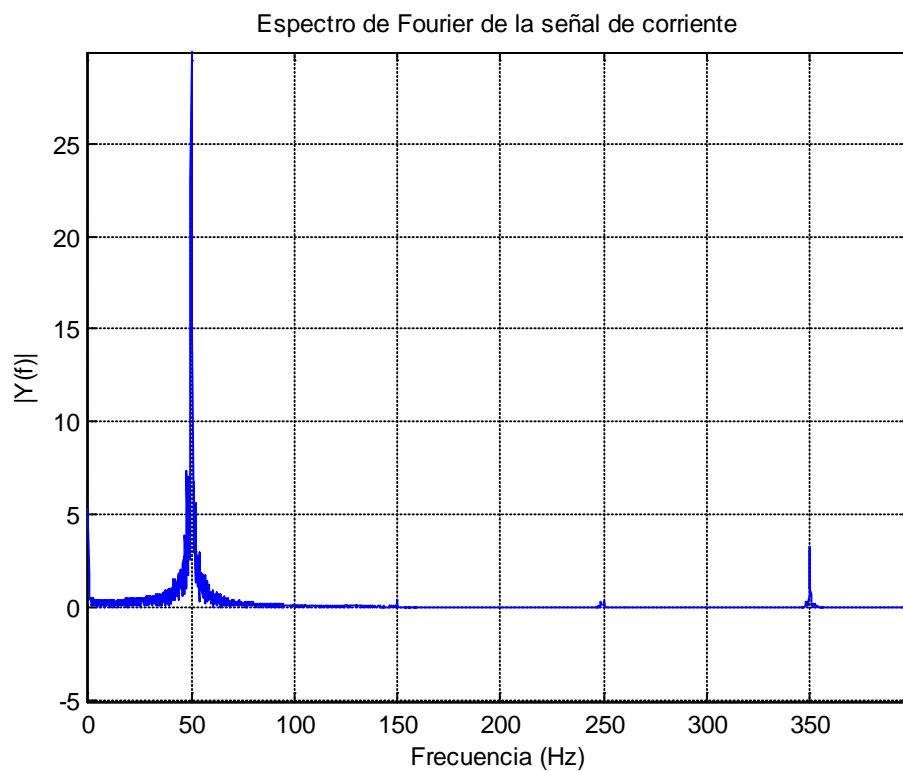
Frecuencia en 595 Hz correspondiente a ranurado de rotor.

Frecuencia en 295, 495, 595 y 795 Hz correspondiente a ranurado de rotor y saturación al igual que en el caso del análisis de Fourier.

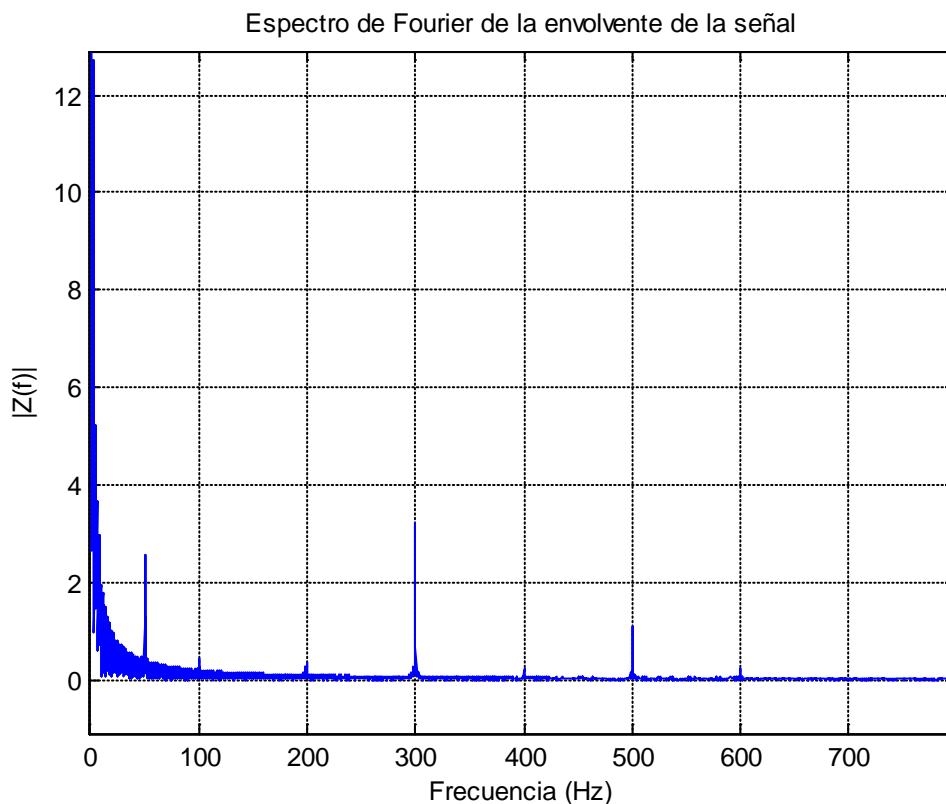
La respuesta en frecuencia para el motor m7 se muestra a continuación:



**Ilustración 30. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor m7.**



**Ilustración 31. Respuesta en frecuencia análisis clásico motor m7 énfasis en bajas frecuencias.**



**Ilustración 32. Respuesta de frecuencia para la envolvente del motor m7.**

Hay una componente cercana a 50 Hz, en primera instancia correspondería a falla de excentricidad dinámica, pero dado que no se presentaron las componentes de en la respuesta de Fourier clásica, se puede suponer que corresponde a un remanente de la componente fundamental que no fue totalmente removida.

Por otra parte, hay componentes de armónicos en 200, 300 y 500 Hz evidenciando la saturación del equipo de forma similar al análisis clásico.

El motor m8 evidenció las componentes de frecuencia que se muestran en las ilustraciones 4.23 y 4.24:

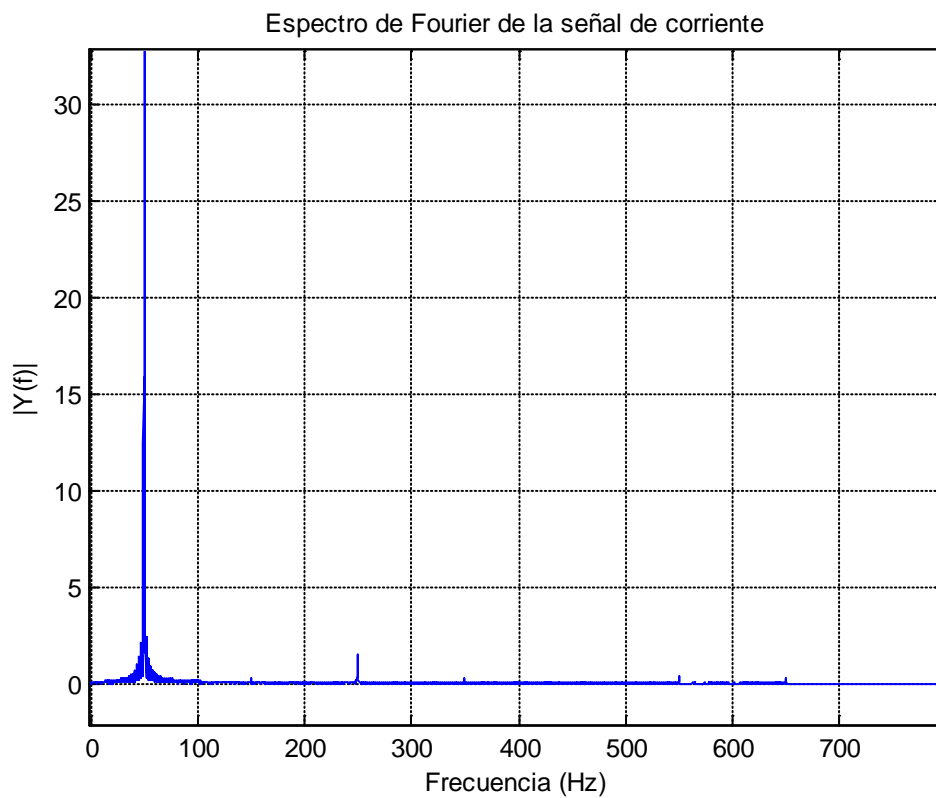


Ilustración 33. Respuesta en frecuencia análisis clásico motor m8.

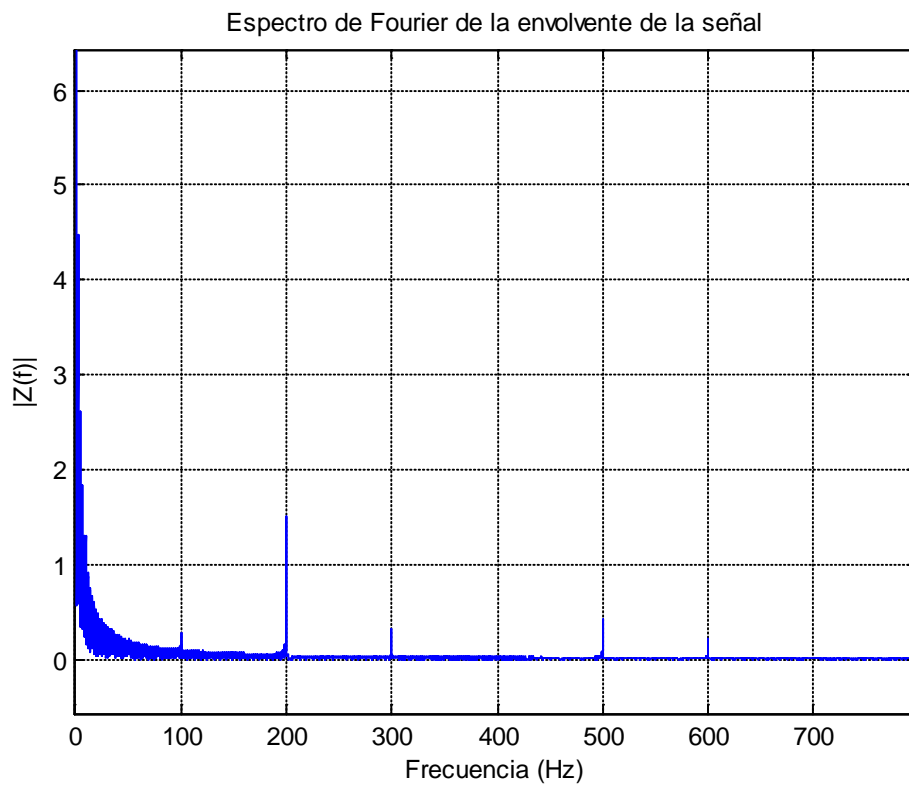


Ilustración 34. Respuesta en frecuencia envolvente motor m8.

Las componentes de frecuencia de esta última muestra presentada, corresponden a 100, 200 y 300 Hz. Ya se sabe que corresponde a saturación. Hay también componentes en 500 y 600 Hz pero no corresponden a ninguna de las fallas o fenómenos descritos, así que se pueden categorizar sólo como armónicos que aportan a la saturación del equipo.

## 4.4 Conclusiones del capítulo

El análisis predictivo tiene varias ventajas sobre el mantenimiento correctivo, en primer lugar se puede mencionar el hecho de que se evita un paro intempestivo de la planta debido al fallo total de un motor, con las correspondientes pérdidas de producción, horas hombre, e incluso peligro para los operarios por algún quiebre violento que conlleve a rompimiento de poleas o correas, caída de material u otras consecuencias.

En este contexto, una forma efectiva de detectar o monitorear fallas tanto avanzadas como incipientes, es la metodología del análisis de frecuencia mediante la utilización de la transformada de Fourier. Al mismo tiempo, el esquema de analizar la envolvente en lugar de la señal misma utilizando la transformada de Hilbert, proporciona una metodología más simple debido a que se elimina del análisis la componente fundamental, y mediante la reformulación de las componentes de frecuencias asociadas a fallas, permite identificar con mayor facilidad alguna falla presente en el equipo.

En el presente trabajo se utilizaron ambas metodologías en paralelo, demostrando que es posible identificar tanto fenómenos del motor como fallas mecánicas. Se encontraron fácilmente las componentes de saturación y otros fenómenos como excentricidad dinámica que, en el contexto de eficiencia energética, son graves atenuantes para que un equipo opere en condiciones de eficiencia nominal. Además se encontraron componentes de frecuencia asociados a fallas mecánicas como rotura de barras. Este hecho naturalmente es de utilidad para la planta en cuestión pues se trata de motores que están en plena operación y que trabajan con un elevado índice de utilización (más de 8400 horas al año).

El hecho de eliminar la componente fundamental del análisis, efectivamente permite una identificación más directa de las componentes de falla en el espectro de frecuencias, mostrando que la aplicación de esta metodología es una buena alternativa para monitorear y detectar fallas y fenómenos indeseados en el motor de inducción.

## **5. Análisis Técnico-Económico de reemplazo de motores.**

### **5.1 Estimación de la eficiencia de los motores de planta**

El desarrollo de este cálculo se puede desarrollar conociendo qué norma cumplen los motores de la planta. En el caso de la papelería éstos corresponden a la clase IE1. Luego, extrayendo los valores de eficiencia estándar de la norma IEC 60034-30, para el número de polos que corresponda.

Para este efecto, se toman en cuenta los motores en estudio, que corresponden a aquellos cuya potencia nominal es de 55kW hacia arriba.

### **5.2 Evaluación económica de reemplazo de motores**

Para este análisis se tomarán en cuenta tres situaciones que corresponderán al estado base, al estado de alta eficiencia y al estado de eficiencia premium. Se usarán las eficiencias establecidas por la norma para establecer el periodo de recuperación de capital.

Los estados que se mencionan corresponden a la norma según la siguiente notación:

Estado Base: Se denominan IE1, corresponden a los motores de eficiencia estándar y sus eficiencias mínimas están dadas por la norma IEC 60034-30.

Estado Alta eficiencia: Se denominan IE2, corresponden a los motores de eficiencia alta y sus eficiencias mínimas están dadas por la norma IEC 60034-30.

Estado Eficiencia Premium: Se denominan IE3, corresponden a los motores de eficiencia premium y sus eficiencias mínimas están dadas por la norma IEC 60034-30.

#### **5.2.1 Costos de inversión.**

Los costos de los motores estarán dados por un valor entregado por el distribuidor de equipos de Papeles Cordillera, sumado a un porcentaje no menor al 10% atribuible a montaje y puesta en marcha.

En general, una buena aproximación es suponer un costo de inversión de 1000USD/10 kW, aumentando el monto en un 10% para el motor de eficiencia Premium, en el rango de 55 kW hasta 1000 kW. En este rango el precio de mercado de los motores puede aproximarse linealmente, a menos que se tenga un dato certero, como efectivamente ocurre en este caso.



Los precios referenciales a considerar quedan establecidos de la siguiente forma:

Potencia KW	IE1 USD	IE2 USD	IE3 USD
55	5227,5	-	6150
75	6960,65	-	8189
110	8494,05	-	9993
160	19456,5	-	22890
400	34340	40400	-

Tabla 5.4. Precios de los motores según eficiencia.

Para los motores de 400 kW o superior, el fabricante no dispone de motores que satisfagan la categoría premium. Para el costo de los motores IE1, se calculó un 15% menos del equivalente IE3, (equivalente en términos de potencia nominal).

Ahora, los valores que serán considerados en el cálculo del VAN corresponden a los mostrados ajustados con un 12% adicional dado por el montaje. El transporte es en general cubierto por el fabricante, tal como ocurre en este caso.

Los valores son:

Potencia KW	IE1 USD	IE2 USD	IE3 USD
55	5854,8	-	6888
75	7795,928	-	9171,68
110	9513,336	-	11192,16
160	21791,28	-	25636,8
400	38460,8	45248	-

Tabla 5.2. Precios de motores después de montaje.

No existe el costo asociado al tipo IE3 para motores iguales o superiores a 400 kW, puesto que el fabricante no cuenta con ellos.

## 5.2.2 Costos de Operación.

Los costos de operación se definen como los costos en que se incurre para poder llevar a cabo el funcionamiento. En el caso de los motores eléctricos, corresponden a los costos de la energía utilizada y los costos de mantenimiento y reparación. Este último no se considerará en el análisis pues la idea del estudio es reemplazar motores de eficiencia estándar por su equivalente nuevo o por motores de eficiencia Premium.

El costo de operación se calculará de la siguiente forma:

$$CO = \frac{P_{nom} * f_c * HU_{anual} * P_{energía}}{\eta}$$

### Ecuación 5.1. Costo Operación

En que

$P_{nom}$  corresponde a la potencia nominal del motor en KW

$f_c$  es el factor de carga en tanto por uno.

$HU_{anual}$  son las horas de uso promedio al año.

$P_{energía}$  es el precio de la energía en USD/KWh

$\eta$  corresponde a la eficiencia del motor en planta en tanto por uno, ajustado de acuerdo al factor de carga.

Este ajuste es modelado por la ecuación que se muestra a continuación<sup>11</sup>:

$$\eta = \eta_0 \frac{f_c}{f_c * \eta_0 + (1 - \eta_0)(0,5f_c^2 + 0,5)}$$

### Ecuación 5.2. Eficiencia del motor ajustado al factor de carga

Donde:

$\eta_0$  corresponde a la eficiencia nominal del motor en tanto por uno.

Como se explicó en capítulos anteriores no sólo el factor de carga afecta la eficiencia de los motores, sin embargo, se desestimarán otros por las razones que se explican:

Para el caso de la altura, la Papelera se ubica a una altura no mayor a 1000 msnm, lo cual permite que el motor no pierda eficiencia debido a operación a altura fuera de la nominal.

Las fases de los voltajes se supondrán sin mayores variaciones al igual que la frecuencia. Esta suposición tiene un buen fundamento pues en el monitoreo de los motores se constata que el voltaje se mantiene en el valor nominal a lo largo de la operación.

La comparación se establece para un caso base en que los motores de eficiencia estándar se instalan a partir de cero. Esto se justifica por el hecho de que la Máquina 20 ya superó los 10 años de operación y por lo tanto los motores están en su segunda mitad de vida útil. Esto simplifica el análisis, ya que permite obviar la comparación de reemplazo de motores vs rebobinado de motores obsoletos y, por otra parte, los costos de mantención se pueden suponer similares para todos los estados. Este último supuesto no es para nada exigente para los fines del estudio, pues un motor eficiente presenta menos probabilidad de falla con respecto a uno tradicional debido a sus mayores exigencias y estándares de fabricación.

---

<sup>11</sup> Modelo obtenido por el Programa de Investigaciones en Energía (PRIEN), para la Corporación Nacional del Cobre Codelco - Chile

### 5.2.3 Cálculo de Indicadores de la evaluación. VAN y TIR.

Se calculará el VAN como una forma de medir cuán rentable es el proyecto, y la TIR para evaluar a qué tasa hay indiferencia con respecto a ejecutarlo o no.

El VAN se debe calcular de la siguiente forma:

$$VAN = \sum_{i=1}^{10} \frac{F_i}{(1+r)^i}$$

**Ecuación 5.3. Valor Actual Neto**

Hay que establecer algunos parámetros:

El horizonte de evaluación se asume de 10 años. La tasa de descuento es de 12%. Los flujos de caja son calculados de la siguiente forma:

$$F_0 = I_{base} - I_{otroestado}$$

$$F_i = CO_{base} - CO_{otroestado}$$

Donde los flujos van desde el período 1 hasta 10. Sólo se incluyeron en el flujo de caja los costos de operación pues como se dijo los costos de mantención se asumen iguales y por tanto se anulan entre sí.

La TIR se calcula igualando el VAN a cero y encontrando a qué tasa eso se produce.

### 5.2.4 Resultados de la evaluación económica.

Los resultados que se muestran en la tabla 5.3 corresponden a la evaluación económica de reemplazo de motores. El procedimiento se llevó a cabo de la forma que se expuso en el apartado anterior.

VAN y TIR para compra de motores eficientes vs estándar.			Reducción de 5% costo	
<u>Motores</u>	<u>VAN USD</u>	<u>TIR promedio</u>	<u>VAN USD</u>	<u>TIR promedio</u>
Hasta 200 kW f carga real	\$ 526.184	100%	\$ 595.076	185%
Hasta 200 kW f carga 0,7	\$ 699.786	129%	\$ 706.230	136%

VAN y TIR para reemplazo de motores estándar por eficientes.			Reducción de 5% costo	
<u>Motores</u>	<u>VAN USD</u>	<u>TIR promedio</u>	<u>VAN USD</u>	<u>TIR promedio</u>
Hasta 200 kW f carga real	-	-		
Hasta 200 kW f carga 0,7	-\$ 492.585	3,991%	-\$ 420.258	5,1%

**Tabla 5.3. Resultados de la evaluación económica de recambio.**

Los supuestos generales para el cálculo de este ejercicio, son los siguientes:

- Se asume tasa de 12%
- Horizonte de evaluación de 10 años.
- Depreciación lineal en los primeros 5 años del total del activo.

### **5.3 Conclusiones del capítulo.**

Hay bastantes estudios sobre utilización de motores eficientes en plantas industriales. En el caso de la planta papelera de este estudio, aunque sin pérdida de generalidad, se concluye que el reemplazo de motores no es conveniente. En primer lugar porque el parque estudiado es joven, los motores tienen por lo menos 10 años de vida útil por delante y por ello el diferencial de precio entre un motor eficiente y uno estándar no se alcanza a cubrir.

No es novedad, pero de todas formas no está de más constatarlo en este apartado, la compra de motores eficientes para un proyecto nuevo es absolutamente una buena decisión desde el punto de vista económico. El VAN positivo reflejó que la decisión es favorable con respecto a los motores estándar pese a su mayor costo inicial. En general en este tipo de análisis, hay que tener presente que un motor eficiente además de consumir menos energía por el mismo trabajo realizado, es más barato de mantener, tiene una mayor vida útil y responde mejor ante situaciones extremas de altura, o temperatura, por ejemplo.

## 6. Conclusiones generales

La eficiencia energética es un concepto amplio, transversal en la industria y un gran desafío en términos medioambientales para estas instituciones y por supuesto también para las entidades gubernamentales.

Cuando se habla de eficiencia energética hay que tener presente una serie de parámetros que se conjugan. Además del análisis de inversiones, donde se analizan costos y beneficios, es necesario ver el proceso de forma integral. Esto es, desde la gestión humana, hasta los procesos netamente mecánicos que están involucrados. Así, es importante destacar el papel que juega el mantenimiento de los equipos que operan en un proceso industrial.

En el presente trabajo se habló de mantenimiento predictivo privilegiándolo por sobre el mantenimiento correctivo. La razón más importante que lleva a esta afirmación es el hecho de que se evita un paro intempestivo de la planta. Si esta situación ocurre se generan pérdidas económicas por dejar de producir, pero podría extender a multas por incumplimiento de contratos, pérdida de éstos u otras situaciones. En otro sentido también podría generar accidentes derivados de roturas o cortes de correas, poleas u objetos rígidos. Por otra parte, el mantenimiento predictivo permite llevar un orden en las mantenciones y cambios de equipos, lo que facilita la planificación en la industria y mediante una buena gestión se minimizan los recursos empleados y optimizan los beneficios.

La metodología de detección o monitoreo de fallas que se llevó a la práctica en este caso corresponde al análisis del espectro de frecuencias de la señal de corriente de los motores de inducción que sirvieron de muestra. Paralelamente se aplicó un esquema alternativo que consiste en el análisis del espectro de frecuencias de la envolvente de dicha señal. En ambos casos se utilizó la transformada de Fourier, agregando la herramienta proporcionada por la transformada de Hilbert, que permite identificar la envolvente. Se demostró que esta metodología tiene la ventaja de identificar con mayor claridad las componentes asociadas a las fallas o fenómenos indeseados, dado que remueve del espectro de frecuencias la componente fundamental, cuya magnitud es muy superior a la magnitud de las componentes de falla.

Con respecto a los resultados detectados, la gran mayoría de los equipos presenta armónicos de saturación. Es bien conocido el hecho de que a mayor magnitud de los armónicos, mayores son los aumentos de temperatura ante los requerimientos extra de voltaje, produciéndose pérdidas que alejan la eficiencia del equipo de su parámetro óptimo. Otro fenómeno magnético que se detectó en 3 de los 7 equipos sometidos a prueba, fue la excentricidad dinámica. Al igual que el fenómeno de saturación, esta situación aumenta la temperatura del equipo aumentando las pérdidas del mismo. Esto se debe principalmente a que al no estar perfectamente centrado el rotor en su posición de giro, se generan campos magnéticos desiguales que en el largo plazo resultará en falla en los rodamientos y en el aislamiento. Por otra parte, se detectó que uno de los equipos tiene una o más barras cortadas, lo cual constituye no un fenómeno magnético sino una falla mecánica. Una barra rota provocará calor intenso en la zona de ruptura, pudiendo destruir el aislamiento cercano a las laminaciones.

En definitiva, tanto las fallas asociadas a fenómenos magnéticos como mecánicos generan calor y por ende, pérdidas de energía. Además conllevan a otras fallas que finalmente terminarán en colapso del motor e interrupción del proceso productivo.

En este sentido, el análisis predictivo o de monitoreo de fallas mediante el espectro de frecuencias de la señal de corriente del estator del motor, proporciona un método que no interrumpe el proceso productivo,

pues la señal de corriente es obtenida en régimen permanente, y además permite detectar de forma fácil, especialmente con la ayuda del esquema de análisis de envolvente a través de la transformada de Hilbert.

Otra ventaja importante de este método es que requiere un costo y tiempo bajo de ejecución. Un equipo registrador de señales es posible de operar por personal de la planta con algo de entrenamiento.

Finalmente, con respecto a la factibilidad de recambio de motores por su alternativa eficiente, se dejó claro en el apartado correspondiente que dicha opción no reporta beneficios económicos. Este resultado podría cambiar si la planta lleva más años trabajando y la tasa de falla en los equipos es más alta. En el caso de la planta estudiada, los equipos han presentado una baja tasa de recambio por fallas. Si la situación es un proyecto desde cero, una planta que empieza recién su operación, los indicadores económicos como VAN y TIR indican que indubitativamente se debe optar por la alternativa de motores eficientes.

Los aspectos que marcan este trabajo como distintivo de otros de su categoría, es por cierto, que muestra en paralelo dos métodos, que si bien tienen mucho en común, permiten una forma simple de detectar o monitorear fallas en motores de inducción. Por otra parte, se realizaron pruebas reales, con motores a plena carga, como parte de un importante proceso productivo de la planta papelera de Papeles Cordillera S.A.

Como aspectos futuros a tratar en eventuales trabajos futuros que tengan relación con éste, cabe mencionar la involucración de métodos alternativos para comparar la confiabilidad del método, como por ejemplo, medición de temperaturas, análisis de vibraciones etc. Si bien, en este trabajo se planteó que este método tiene ventajas sobre ellos, no necesariamente significa que deban descartarse como métodos eficientes de detección de fallas. Además, un futuro trabajo podría incorporar un análisis de la variación de la magnitud de las componentes en función de parámetros concretos que dicten la intensidad de la falla, por ejemplo, el número de barras rotas. Si bien, en este trabajo se indicó que de hecho hay una relación directamente proporcional entre la intensidad de la falla y la magnitud de las componentes de armónicos, no se llegó a establecer una relación parametrizada.

## 7. Bibliografía

- [1] PRIEN, Caracterización del parque actual de motores eléctricos en Chile, Estudio preparado para la Subsecretaría del Ministerio de Minería, Diciembre de 2006.
- [2] Guillermo Jiménez, Alfredo Muñoz, Manuel Duarte; Un nuevo Esquema de Análisis de Fallas mediante la medición de la Corriente de Estator en Motores de Inducción, Paper presentado en el Décimo encuentro Regional Latinoamericano de la Cigré, Puerto Iguazú, Argentina, 2003
- [3] Alfredo Muñoz, Guillermo Jiménez, PRIEN, Confiabilidad de Motores Eléctricos: Análisis Armónico, Transformada Hilbert y Aislamiento Eléctrico, Paper presentado en SICEL Bogotá, Colombia, 2003.
- [4] Juan C. Hidalgo B. TERMOGRAM, Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos, Paper IEEE, San José, Costa Rica..
- [5] Claudio Cortés Muñoz, Planta Minera Quellaveco: Desarrollo de un Modelo de Eficiencia Energética, Memoria de Ingeniero, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 2010.
- [6] Marcelo Castelli, Juan Pablo Fosatti, Marcos Andrade, Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción. 2008.
- [7] José Juan Rincón Pasaye, Procesamiento digital de señales. Apuntes de Clase, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, 2009.
- [8] Manuel Vargas Villanueva, Introducción a Matlab. Tutorial formato PDF. <http://www.esi2.us.es/~vargas/docencia/cpc/guiasMatlab/tutorialMatlab.pdf>
- [9] University of Rhode Island. Department of Electrical and Computer Engineering. FFT Tutorial.
- [10] Comisión Nacional de Energía, Diseño de una Estrategia Energética para Chile. 2009 [www.cne.cl](http://www.cne.cl)
- [11] Pedro Maldonado, Estudio sobre empresas energointensivas y su posible contribución a programas de eficiencia energética, 2008. <http://www.eclac.org>
- [12] US Energy Information Administration, <http://www.eia.gov/electricity/>
- [13] Comisión Nacional de Energía CNE y Cooperación Técnica Alemana GTZ, “Las ERNC en el mercado eléctrico chileno”, 2009.
- [14] Papeles Cordillera, CMPC, <http://www.papelescordillera.cl/>
- [15] Alfredo Muñoz R, Diagnóstico del estado de una máquina eléctrica, detección en terreno de fallas y mantenimiento predictivo. Apuntes de Curso, Máquinas Eléctricas para la Industria y la Minería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 2010.
- [16] A. E. Fitzgerald, Electric Machinery, Editorial Mc Graw Hill, Sexta Edición, 2003.

- [17] Jorge Jara Monje, “Aplicaciones de Variadores de Frecuencia en Correas de Gran Tonelaje”; Tesis de Ingeniero, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 2002
- [18] Alfredo Muñoz Ramos, “Métodos para orientar la adquisición de motores eléctricos en la industria y la minería”, Apuntes de Curso, Máquinas Eléctricas para la Industria y la Minería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 2010
- [19] US Department of Energy “Improving Compressed Air System Performance”.
- [20] Marcelo Tokman, “El Futuro Energético de Chile”, 2009 [www.cne.cl](http://www.cne.cl)
- [21] Timothy M. Thomas, “Monitor Conditioning Monitoring, Efficiency does Matter”, Baker Instrument Company an SKF Group Company, 2008. <http://www.netaworld.org>
- [22] M.L. SIN, W.L. Soong and N. Ertugrul; “Induction Machine On-Line Condition Monitoring and Fault Diagnosis”, University of Adelaide. <http://adelaide.academia.edu>
- [23] Neelam Mehla, Ratna Dahiya; “An Approach of Condition Monitoring of Induction Motor Using MCSA”, 2007. <http://www.wseas.us/journals/saed/saed-3.pdf>
- [24] Departamento de Producción MP20, Papeles Cordillera S.A., “Ficha Técnica MP20”, 2008.
- [25] Ricardo Ramos Cid, “Sistema de evaluación Técnico Económica de Medidas de Uso Eficiente de Energía Eléctrica en el Parque de Motores de una Planta Concentradora de Cobre”, Memoria de Ingeniero, Universidad de Chile, 2008.
- [26] Soto Salvá N., Torre Silva F. de la. Diagnóstico de problemas de asimetrías rotóricas en un motor de inducción de gran potencia. Instituto Superior Politécnico, Cuba. 2007.



## 8. Anexos

### Anexo A. Extracto de la base de datos de Motores

ITEM	DATOS EQUIPOS		
	Area	Denominación	Tag
1	10	POLIN COUCH TELA REVERSO	010-71-126
2	10	POLIN MOTRIZ TELA REVERSO	010-71-127
3	10	GENERADOR DE FRENO, BOBINADORA	010-71-195
4	10	FAN PUMP LINEA CARA	060-71-027
5	10	FAN PUMP LINEA REVERSO	060-71-033
6	10	POLIN MOTRIZ TELA CARA	010-71-123
7	10	NIPCOFLEX 1 ACCTO. 1	010-71-133
8	10	NIPCOFLEX 1 ACCTO. 2	010-71-134
9	10	NIPCOFLEX 2 ACCTO. 1	010-71-137
10	10	NIPCOFLEX 2 ACCTO. 2	010-71-138
11	10	DUOFORMER	010-71-2278
12	10	POLIN PORTANTE 1, BOBINADORA	010-71-192
13	10	POLIN PORTANTE 2, BOBINADORA	010-71-193
14	10	BOMBA. ALIMENTACION MODULE JET	080-71-064
15	10	POLIN DE TRANSF. LINEA CARA	010-71-124
16	10	POLIN GUIA 2 TELA REVERSO	010-71-129
17	10	POPE	010-71-189
18	10	LISA RODILLO CALIENTE	010-71-173
19	10	LISA RODILLO ECONIP	010-71-174
20	10	2do GRUPO SECADOR ACCTO. 2	010-71-142

### AnexoB. Extracto de la base de datos de corrientes para los motores de la muestra seleccionada.

Tiempo [s]	Amplitud [A]
0.000000	-118.7
0.000312	-143.1
0.000625	-190.3
0.000937	-248.1
0.001249	-306
0.001562	-360.8

0.001874	-397.3
0.002187	-403.4
0.002499	-368.4
0.002811	-281.6
0.003124	-115.7
0.003436	12.2
0.003748	15.2
0.004061	19.8
0.004373	25.9
0.004685	28.9
0.004998	33.5
0.005310	35
0.005622	35
0.005935	30.4
0.006247	25.9
0.006560	91.3
0.006872	118.7
0.007184	165.9
0.007497	234.4
0.007809	307.5
0.008121	377.5
0.008434	430.8
0.008746	456.7
0.009058	438.4
0.009371	362.3
0.009683	245.1
0.009995	117.2
0.010308	143.1
0.010620	194.8
0.010933	255.7
0.011245	316.6
0.011557	368.4
0.011870	403.4
0.012182	411
0.012494	376
0.012807	290.7
0.013119	126.3
0.013431	-16.7
0.013744	-19.8
0.014056	-24.4
0.014368	-28.9
0.014681	-33.5
0.014993	-38.1
0.015306	-39.6

0.015618	-39.6
0.015930	-35
0.016243	-32
0.016555	-98.9
0.016867	-127.9
0.017180	-175.1
0.017492	-235.9
0.017804	-304.4
0.018117	-360.8
0.018429	-408
0.018741	-421.7
0.019054	-395.8
0.019366	-322.7
0.019679	-210.1
0.019991	-108.1
0.020303	-141.6
0.020616	-200.9
0.020928	-271
0.021240	-339.5
0.021553	-397.3
0.021865	-433.8
0.022177	-441.4
0.022490	-403.4
0.022802	-312.1
0.023114	-144.6
0.023427	13.7
0.023739	15.2
0.024052	19.8
0.024364	22.8
0.024676	28.9
0.024989	32
0.025301	33.5
0.025613	33.5
0.025926	30.4
0.026238	32
0.026550	95.9
0.026863	121.8
0.027175	172
0.027488	235.9
0.027800	306
0.028112	369.9
0.028425	415.6
0.028737	433.8
0.029049	412.5

0.029362	336.4
0.029674	219.2
0.029986	109.6
0.030299	143.1
0.030611	202.5

## Anexo C. Código en Matlab para Procesar los datos de corrientes.

```

Fs = 3200;           % Sampling frequency
T = 1/Fs;           % Sample time
L = 12800;          % Length of signal
t = (0:L-1)*T;      % Time vector

y = a3m12800;       % Sinusoids plus noise
%plot(Fs*t(1:50),y(1:50))
NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y
%NFFT2 = 4*2^nextpow2(L);
Y = fft(y,NFFT)/L;
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
%f2 = Fs/2*linspace(0,1,NFFT2/2+1);

% Plot single-sided amplitude spectrum.
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
title('Espectro de Fourier de la señal de corriente')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('|Y(f)|')
grid on
car=axis;
z=abs(hilbert(y));
Z = fft(z,NFFT)/L;
figure (2);
plot(f,2*abs(Z(1:NFFT/2+1)))
title('Espectro de Fourier de la envolvente de la señal')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('|Z(f)|')
grid on
AXIS([car(1) car(2) 0 car(4)/5])

```

Código para calcular la Transformada de Hilbert

```

function x = hilbert(xr,n)
%HILBERT Discrete-time analytic signal via Hilbert transform.
% X = HILBERT(Xr) computes the so-called discrete-time analytic signal
% X = Xr + i*Xi such that Xi is the Hilbert transform of real vector Xr.
% If the input Xr is complex, then only the real part is used: Xr=real(Xr).
% If Xr is a matrix, then HILBERT operates along the columns of Xr.
%
% HILBERT(Xr,N) computes the N-point Hilbert transform. Xr is padded with
% zeros if it has less than N points, and truncated if it has more.
%
% For a discrete-time analytic signal X, the last half of fft(X) is zero,
% and the first (DC) and center (Nyquist) elements of fft(X) are purely
real.
%

```

```

% Copyright 1988-2008 The MathWorks, Inc.
% $Revision: 1.10.4.4 $ $Date: 2008/09/13 07:14:19 $

if margin<2, n=[]; end
if ~isreal(xr)
    warning(generatemsgid('Ignore'),'HILBERT ignores imaginary part of input.')
    xr = real(xr);
end
% Work along the first nonsingleton dimension
[xr,nshifts] = shiftdim(xr);
if isempty(n)
    n = size(xr,1);
end
x = fft(xr,n,1); % n-point FFT over columns.
h = zeros(n,~isempty(x)); % nx1 for nonempty. 0x0 for empty.
if n > 0 && 2*fix(n/2) == n
    % even and nonempty
    h([1 n/2+1]) = 1;
    h(2:n/2) = 2;
elseif n>0
    % odd and nonempty
    h(1) = 1;
    h(2:(n+1)/2) = 2;
end
x = ifft(x.*h(:,ones(1,size(x,2)))));

% Convert back to the original shape.
x = shiftdim(x,-nshifts);

```