

CAPÍTULO II

2. ARQUITECTURA

En este capítulo se hace una síntesis de la arquitectura del sistema, dando una explicación de las etapas necesarias en su implementación.

El sistema funciona en varias partes constitutivas que son:

- Motor.
- Transductor.
- Adquisición.
- Procesamiento digital de señales.
- Detección de la falla usando MCSA.
- Almacenamiento de datos.
- Reporte.

La visión general del sistema se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 2.1.

En síntesis, el proceso comienza con la puesta en marcha del motor a evaluar. Una vez que está funcionando en estado estable, señales de corriente de línea y voltaje de fase son sensadas y acondicionadas mediante un transductor adecuado para cada una, de manera que se acople a las necesidades del sistema de adquisición de datos, que es la siguiente etapa. En ésta, se digitaliza la señal y se almacena en una PC. Éstas se filtran digitalmente con el fin de dejarlas listas para que entren a una “máquina” digital de detección de fallas, que no es más que un algoritmo que analiza las características de las señales procesadas e

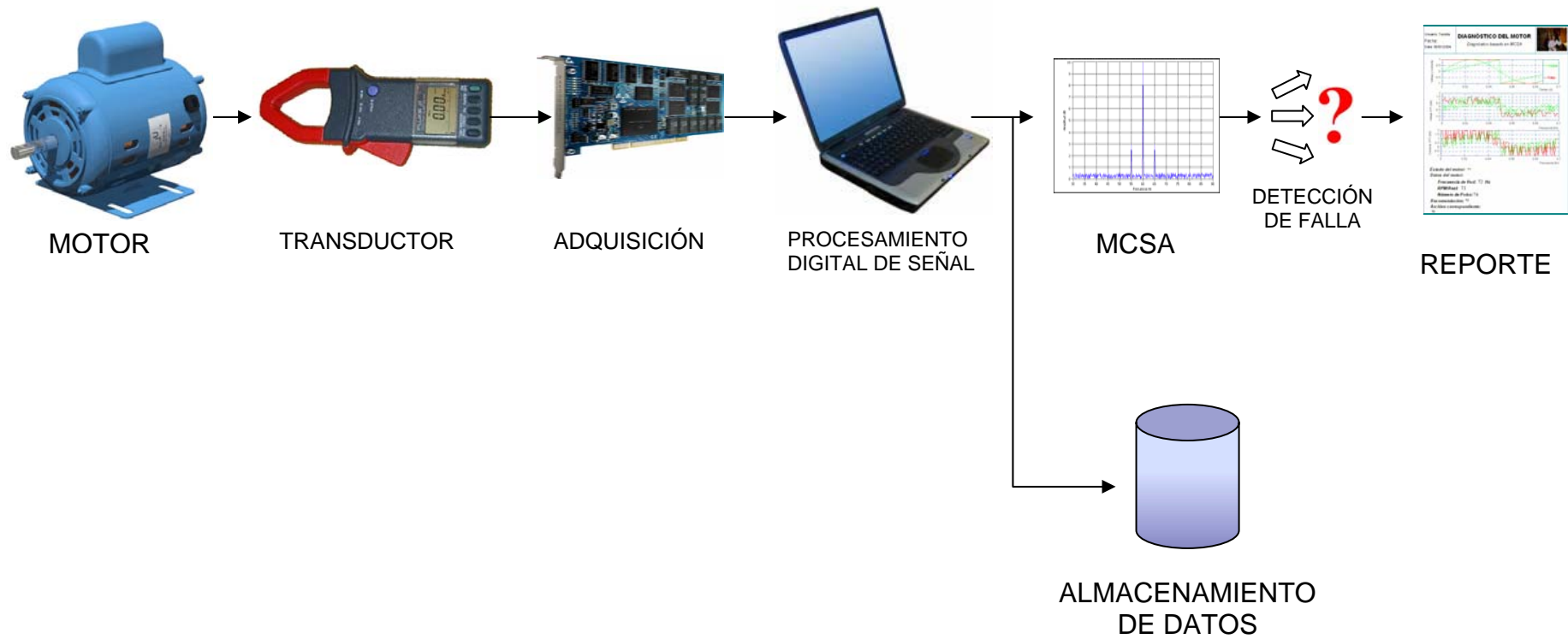


Figura 2.1. Diagrama de bloques del proyecto.

implementa los criterios de MCSA para identificar la naturaleza y gravedad de la falla. Al mismo tiempo se envían los datos de las señales de corriente y voltaje en el dominio del tiempo y frecuencia sea a una hoja de datos, a una Base de Datos estandarizada o simplemente no se almacena a criterio del usuario. Finalmente, se genera un reporte que se guarda en la PC.

2.1 MOTOR.

Dentro del campo de las máquinas eléctricas, el estudio de los motores de inducción ha tenido un gran desarrollo debido a la importancia y utilidad de este tipo de maquinaria en el sector industrial y productivo. Es así que se tiene modelos eléctricos y matemáticos de los motores de inducción y cada vez más se trata de optimizar su intervención y funcionamiento en sus diversas aplicaciones.

La presente sección no pretende hacer un análisis profundo del principio de funcionamiento de los motores de inducción, ya que el análisis matemático necesario para el proyecto está expuesto en la sección 1.4.2, sino mas bien presentar un panorama global de este tipo de maquinaria enfocado a la aplicación de MCSA para la detección de fallas, y más específicamente la detección de cortocircuitos en los estatores de estos motores.

2.1.1 GENERALIDADES.

En un motor de inducción, el voltaje de alimentación aplicado en los devanados de armadura es un voltaje de magnitud y frecuencia constantes (esto es si no tiene asociado controladores) que puede ser trifásico o

monofásico. En el rotor por efecto de inducción, aparece un voltaje de magnitud y frecuencia variables como consecuencia de la velocidad de giro del rotor, con respecto de la velocidad sincrónica.

Construcción [20]

El motor de inducción como se puede ver en la Figura 2.2 consta principalmente de un estator con sus respectivos devanados, y un rotor cuyos devanados son conductores de cobre o aluminio, denominados “barras del rotor”, embebidos o vaciados en ranuras o agujeros en un núcleo que no es más que un cilindro de acero laminado. Existen dos tipos de rotores: los rotores “jaula de ardilla” y los de tipo devanados. Los primeros, que tal como se muestra en la Figura 2.3 deben su nombre a que las barras se encuentran cortocircuitadas entre sí en ambos extremos por medio de anillos continuos formando una jaula. Estas barras no siempre son paralelas al eje del rotor, sino que suelen estar desviadas cierto ángulo respecto del eje para evitar saltos y disminuir el zumbido de origen magnético durante el funcionamiento del motor. Los rotores “devanados”, en cambio, están constituidos por conductores de cobre conectados generalmente en estrella y aislados del núcleo, y cuyos extremos se conectan a anillos rozantes aislados del eje del rotor.

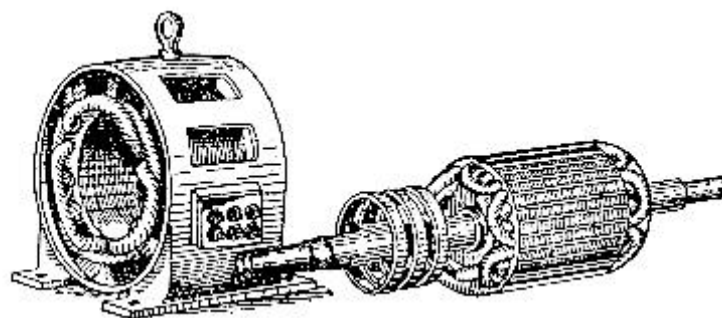


Figura 2.2. Estator y Rotor de un motor de Inducción. [9].

De estos dos tipos de rotores, los motores de inducción tipo jaula de ardilla son los de construcción más simple y económica además de presentar ventajas de funcionamiento tales como la operación en lugares aislados y con ambientes hostiles y abrasivos. Los motores de rotor devanado se usan cuando se necesite alto torque de arranque o cuando se requiera introducir voltajes externos al rotor para, por ejemplo, control de velocidad.

En conclusión los motores de inducción de mayor aplicación son los de tipo jaula de ardilla.



Figura 2.3. a) Jaula de Ardilla b) Rotor tipo Jaula de Ardilla. [9].

Además del rotor y estator, los motores de inducción tienen otros elementos constitutivos, que se muestran en la Figura 2.4.

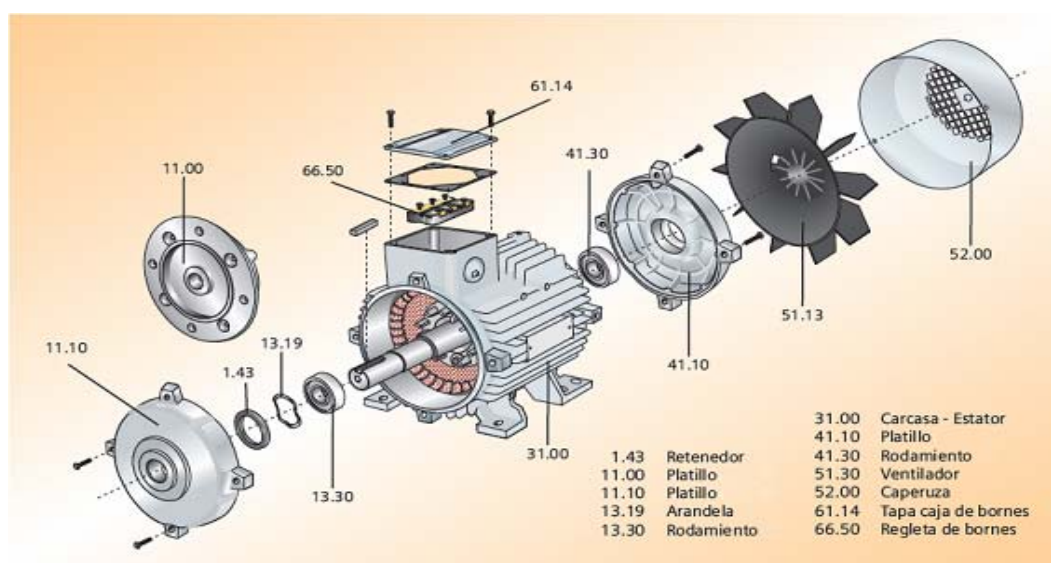


Figura 2.4 Partes Constitutivas de un Motor de Inducción. [21].

Efecto de Aumento de Carga en un Motor de Inducción. [20]

Se analiza el efecto de la carga en el funcionamiento de un motor de inducción tipo jaula de ardilla, al ir desde vacío hasta un poco más allá que plena carga.

Cuando el motor opera *sin carga* o en *vacío*, tanto el deslizamiento como la frecuencia, reactancia y fuerza electromagnética del rotor, son muy pequeñas, es así que el deslizamiento puede ser una fracción de uno por ciento, dando como resultado una velocidad ligeramente menor a la velocidad sincrónica. Además de que en esta condición el factor de potencia en retraso es también extremadamente pequeño.

En el caso de que el motor opere a *media carga*, la velocidad disminuye causando un aumento en el deslizamiento y también en la frecuencia, reactancia y fuerza electromotriz del rotor. Además de que se aumenta el factor de potencia en retraso.

En condición de *plena carga*, el motor girará con un valor de deslizamiento que provee un equilibrio entre el par aplicado al eje y el par desarrollado por la fuerza magnetomotriz del motor. Generalmente en esta condición de carga, el deslizamiento oscila entre el tres y diez por ciento. El factor de potencia aumenta tomando valores entre 0.8 para motores pequeños (1 HP) y 0.95 para motores de mayor potencia (150 HP o mayores).

Si se hace operar al motor en condición *más allá de plena carga*, se tiene como consecuencia un aumento en el deslizamiento, perdiendo el equilibrio entre pares que ocurre a plena carga. Además, la frecuencia de la fuerza magnetomotriz del rotor aumenta, así como su reactancia,

produciéndose una disminución en el factor de potencia en el rotor que se refleja al estator. Esto provoca que al llegar a esta condición de sobrecarga, el factor de potencia se aproxime al máximo, para luego disminuir rápidamente.

Se puede concluir entonces, que el comportamiento del motor sin carga presenta un deslizamiento, reactancia y frecuencia de rotor, y factor de potencia muy pequeños. A medida que la carga aumenta, estos parámetros también aumentan, hasta llegar a condiciones de plena carga, luego de las cuales, el factor de potencia en retraso disminuye. Todos estos parámetros están íntimamente relacionados y manteniendo fijo el deslizamiento con una carga constante, se puede fijar el resto.

2.1.2 MOTORES DE INDUCCIÓN TRIFÁSICOS Y MONOFÁSICOS.

En el mercado se puede encontrar motores de inducción trifásicos y monofásicos. Para escoger efectivamente entre ellos, se debe tener en cuenta las exigencias de la instalación donde se los va a utilizar, el uso que se les va a dar y, sobre todo, se debe considerar los datos de placa que no deben ser excedidos.

Motores trifásicos

Los motores trifásicos usualmente se encuentran en la industria en donde se cuenta con el suministro trifásico en baja tensión necesario para su accionamiento. Las tensiones normalizadas para las redes de corriente trifásica, en baja tensión, son las descritas en la Tabla 2.1. La frecuencia industrial normalizada puede ser de 50 o 60 Hz.

Tabla 2.1 Voltajes nominales de redes trifásicas de Bajo Voltaje [21].

| Tensión de línea (V) | Tensión de fase (V) | Denominación usual de la red (V) |
|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|
| 208 | 120* | 208/120 |
| 220 | 127 | 220/127 |
| 260 | 150 | 260/150 |
| 380 | 220 | 380/220 |
| 440 | 254 | 440/254 |

* Este nivel de voltaje monofásico, puede venir de una red monofásica de 240/120V.

Los motores trifásicos de inducción pueden ser tipo jaula de ardilla o rotor devanado, y su capacidad en potencia puede variar desde fracciones de HP hasta incluso unidades de miles de ellos. Cabe resaltar que al aumentar la potencia del motor, aumenta también la corriente nominal o de plena carga, variable que debe ser sensada para el análisis del motor mediante MCSA. El Anexo C, presenta una lista de motores trifásicos de inducción comerciales en donde, entre sus características operativas, se puede identificar la corriente nominal para cada capacidad de potencia.

Motores monofásicos.

Existen instalaciones, sean industriales o residenciales, en las que la empresa de distribución únicamente provee servicio de corriente alterna monofásica que puede ser fase – fase o fase neutro. Es ahí donde los motores monofásicos son la solución, claro, considerando las restricciones según sus características de placa. Además, estos motores son de mucha utilidad para aplicaciones que no requieren de potencias elevadas puesto que, por lo general, los motores monofásicos comerciales presentan potencias desde fracciones hasta decenas de HP, tal como se puede ver en el Anexo C. En consecuencia, sus corrientes nominales serán también pequeñas en comparación con motores trifásicos de gran capacidad.

Características y Construcción [20].

Un motor monofásico de inducción no tiene de forma inherente el campo magnético giratorio que se presenta en un motor de alimentación trifásica, es decir, que no tiene arranque propio por lo que requiere de un medio auxiliar para empezar su operación induciendo el giro del rotor. Una vez que el rotor ha girado se desarrolla un campo magnético rotatorio permanente. Para esto, antes de que se inicie la rotación del rotor, el estator produce un campo pulsante.

Desde el punto de vista constructivo, el rotor de cualquier motor monofásico de inducción es intercambiable con uno tipo jaula de ardilla de un motor trifásico, es decir, que el rotor no tiene ninguna diferencia entre estos dos tipos de motores. La diferencia está en el estator ya que para producir el campo rotatorio y el par de arranque, se debe dividir al devanado estático en dos: un *devanado principal* de alta reactancia para disminuir pérdidas y un *devanado auxiliar* para el arranque. Estos dos devanados puestos en paralelo, están conectados a la red monofásica y el devanado auxiliar debe estar desfasado 90° con respecto del devanado principal. Dependiendo del tipo de diseño del motor, el devanado auxiliar se desconecta del circuito una vez que el motor ha arrancado o permanece conectado tanto en el arranque, como en el funcionamiento normal.

Tipos [20].

Existen varios tipos de motores monofásicos de inducción y cada uno difiere de otro por su método de arranque, propiedades de funcionamiento, rango de potencias y aplicaciones para las que son más adecuados. A

continuación se lista los diferentes tipos de estos motores, en los que MCSA puede aplicarse:

- Motores de fase partida.
 - Motor de arranque por resistencia.
 - Motor de arranque por capacitor.
 - Motor de fase partida y capacitor permanente.
 - Motor con capacitor de arranque y capacitor permanente.
- Motor de inducción de arranque por reluctancia.
- Motor de inducción de polos sombreados.

2.1.3 CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR A ANALIZARSE CON MCSA.

En resumen y de acuerdo a las consideraciones del método de diagnóstico descritas en la sección 1.4.3 y las mostradas en la presente sección, el motor a ser monitoreado con MCSA debe cumplir las siguientes características:

- El motor de inducción puede ser trifásico o monofásico.
- Se debe tener acceso a la línea de alimentación al motor, aún cuando éste se encuentre ubicado en una zona inaccesible.
- El motor debe manejar carga constante.
- El motor no debe tener ningún tipo de control de velocidad, es decir debe operar a velocidad constante.
- MCSA es un método aplicable en motores de cualquier potencia siempre y cuando el sensor de corriente sea el adecuado para sensar los niveles de corriente del motor.

2.2 TRANSDUCTOR

El transductor tiene por objeto sensor la variable a ser analizada y acondicionarla de acuerdo a los requerimientos del sistema implementado en base de esta variable. Para el caso de la detección de cortocircuitos en el estator mediante MCSA se requiere sensor señales de corriente y voltaje de alimentación al motor.

La presente sección tiene por objeto analizar diferentes opciones de sensado para señales de corriente y voltaje, y escoger de entre ellas la más adecuada para la implementación de MCSA. Las señales que provean dichos sensores deben ser acondicionadas de acuerdo a los requerimientos necesarios para la adquisición de éstas.

2.2.1 SENSORES DE CORRIENTE.

Existen varias alternativas para realizar sensado de corriente. Cada una de ellas tiene diferente principio de funcionamiento, lo que define características diferentes entre sí. Como opciones a ser aplicadas para la medición de la corriente de alimentación al motor de inducción, se considera los siguientes métodos e instrumentos de sensado:

- Sensor Resistivo.
- Transformador de Corriente (Pinza).
- Sensor de Efecto Hall.

Sensor Resisitivo.

El sensor resistivo se consigue al conectar en serie a la línea en dónde se desea tomar la señal de corriente, una resistencia de valor calculado en función de la corriente por la línea y del voltaje que se desee obtener en su salida. La caída de voltaje sobre la resistencia sensora es una señal con las mismas características que la señal de corriente y su amplitud es directamente proporcional al valor de la resistencia según la ley de Ohm. En la Figura 2.5 se muestra un esquema de la implementación de este método de sensado de corriente, aplicado en un motor.

Este sensor es una opción de muy bajo costo y por la naturaleza de sus elementos constitutivos es totalmente lineal. Sin embargo, presenta deficiencias debido a que la pérdida de potencia es proporcional al cuadrado de la corriente que pasa por la resistencia sensora y en consecuencia no es aplicable en motores de alta potencia que presenten corrientes altas. Además, es un método invasivo ya que se requiere de la desconexión del motor para la conexión en serie de la resistencia.

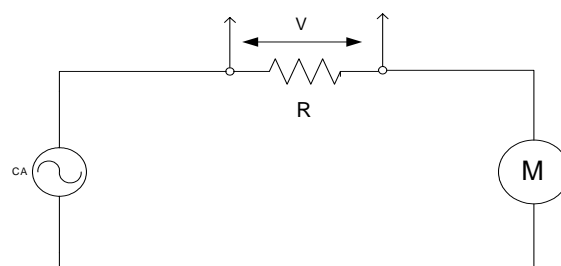


Figura 2.5. Esquema de implementación de la Resistencia Sensora.

Transformador de Corriente (Pinza).

El transformador de corriente (TC) usa el principio de un transformador para convertir la corriente del primario, en una corriente secundaria más pequeña y proporcional a la corriente primaria según la relación de transformación. El TC es un instrumento pasivo, esto significa que no requiere de circuitos adicionales de control o polarización. Adicionalmente, el TC puede medir corrientes muy altas y consumir poca potencia. Sin embargo, el material ferrítico usado en el núcleo puede saturarse cuando la corriente primaria es muy alta o cuando hay una componente importante de corriente continua. Una vez magnetizado, el núcleo contendrá histéresis y su precisión se degradará a menos que éste se desmagnetice de nuevo.

Una aplicación de los TC son las pinzas amperimétricas que son instrumentos para medición de corriente. En algunos casos estos instrumentos marcan directamente el valor y en otros se tiene como salida una señal de voltaje proporcional y con las mismas características que la señal de corriente primaria. Estos dos tipos de pinzas se pueden ver en la Figura 2.6. Las pinzas amperimétricas manejan amplios rangos de medida, que pueden ir desde unidades hasta cientos de amperios.



a)



b)

Figura 2.6. Pinzas amperimétricas: a) Marca la corriente. b) Con salida de voltaje

El sensado de corriente usando pinzas amperimétricas tiene la gran ventaja de ser un método no invasivo ya que no se requiere la desconexión o apertura de la línea de circulación de corriente. Solo es necesario que el instrumento abrace al cable en donde se quiere tomar la señal. Este modo de funcionamiento se ilustra en la Figura 2.7. La Figura 2.8, en cambio, muestra dos aplicaciones reales del uso de una pinza amperimétrica para obtener la señal de corriente de alimentación a un gran motor de inducción [13].

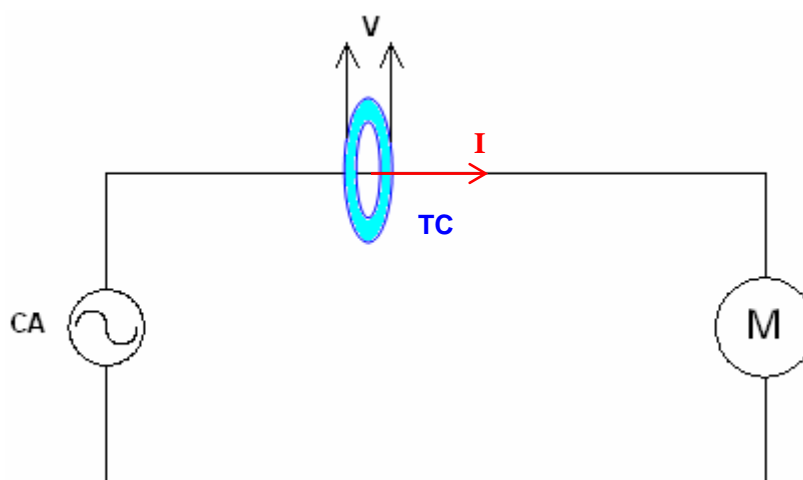


Figura 2.7. Esquema de Medición de Corriente usando TC.



Figura 2.8. Medición de Corriente usando pinzas amperimétricas.

Sensor de Efecto Hall.

El sensor de Efecto Hall mide el campo magnético generado en un núcleo toroidal ferromagnético por el que se hace pasar el cable que lleva la corriente a ser medida. La corriente ocasiona un campo magnético en el cual se ubica al sensor de Efecto Hall que es un dispositivo semiconductor, tal como se muestra en la Figura 2.9. Dentro de la sonda se produce un campo eléctrico que se sitúa transversalmente a la corriente de excitación del circuito de control que pasa a través de él y que es transversal con el campo magnético. La tensión de salida es proporcional al campo magnético cuando se tiene una corriente de excitación constante. La Figura 2.10 muestra el principio de funcionamiento del sensor de Efecto Hall .

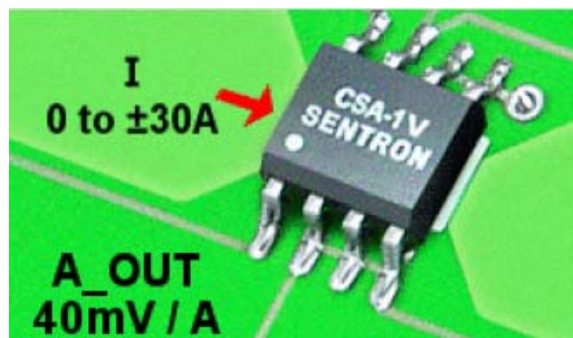


Figura 2.9. Sensor de Efecto Hall. [22]

El sensor de Efecto Hall tiene una excelente respuesta en frecuencia y está capacitado para medir corrientes muy altas. Sin embargo, presenta desventajas como una alta desviación por efectos de la temperatura en el resultado de la medición y la necesidad de circuitos externos de control.

Existen dos tipos principales de sensores de Efecto Hall: anillo abierto (*open-loop*) y anillo cerrado (*closed-loop*). El segundo ofrece mejor precisión y rangos dinámicos más amplios pero a un costo mayor. En general los sensores

de Efecto Hall, comparados con los TC tienen costos elevados, por lo que su aplicación es menos usual.

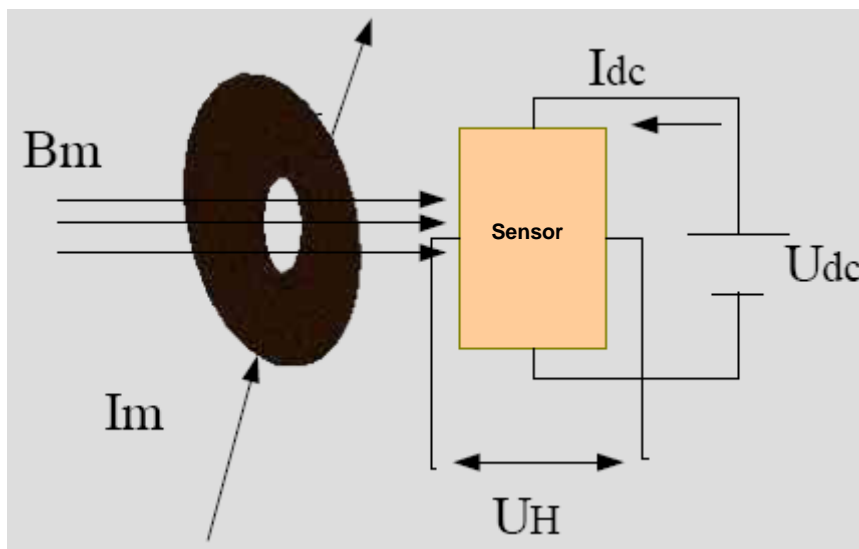


Figura 2.10. Principio de funcionamiento del sensor de Efecto Hall [22]

Resumen de Sensores de Corriente.

La Tabla 2.2 presenta a las tres alternativas de sensado de corriente anteriormente descritas con sus respectivas características operativas, lo que permite compararlas y escoger de entre ellas la más adecuada para los requerimientos del proyecto.

Tabla 2.2 Características de los sensores de corriente[23].

| | Sensor Resistivo | Transformador de Corriente (Pinza) | Sensor de Efecto Hall |
|-------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|
| Costo | Muy bajo | Medio | Alto |
| Linealidad en el Rango de la Medición. | Muy buena | Buena | Pobre |
| Capacidad de Medición de Alta Corriente. | Muy pobre | Buena | Buena |
| Consumo de Potencia. | Alto | Bajo | Medio |
| Saturación de Corriente DC. | No | Si | Si |
| Variación de la Salida con Respecto a la Temperatura. | Medio | Bajo | Alto |
| Problema de Saturación e Histéresis. | No | Si | Si |

2.2.2 REQUERIMIENTOS DEL SENSOR DE CORRIENTE.

Para la implementación del proyecto, el sensor de corriente debe cumplir con las siguientes características:

- Debe poder medir un rango de corriente de al menos el valor nominal o de plena carga del motor a ser evaluado.
- La señal de salida deberá conservar todas las características de la corriente sensada, que para este caso es la corriente que circula por la línea de alimentación al motor.
- La señal de salida del sensor debe poder ser acondicionada al nivel requerido por el sistema de adquisición de datos.
- Debe tener un ancho de banda de 0-500 Hz mínimo (Sección 2.3.2)

2.2.3 SENSORES DE VOLTAJE [22].

Para el sensado de la señal de voltaje se analiza dos métodos muy conocidos, de sencilla aplicación y bajo costo, pero que sin embargo, constituyen un modo eficiente para el sensado de tensión. Estas metodologías son:

- Divisor de Voltaje.
- Transformador de Voltaje.

Divisor de Voltaje.

Este método tal como se ilustra en la Figura 2.11. Consiste en dividir al voltaje modelado como una fuente de corriente alterna V_1 , mediante dos resistencias conectadas en serie a los terminales de la fuente. La señal de

voltaje atenuada V_2 se adquiere sobre una de las resistencias del divisor. La señal de voltaje V_2 conserva las características de la señal de voltaje V_1 , debido al uso de elementos resistivos. Los valores de las resistencias del divisor pueden ser calculados a partir de la expresión 2.1 para tener a la salida el nivel de voltaje deseado.

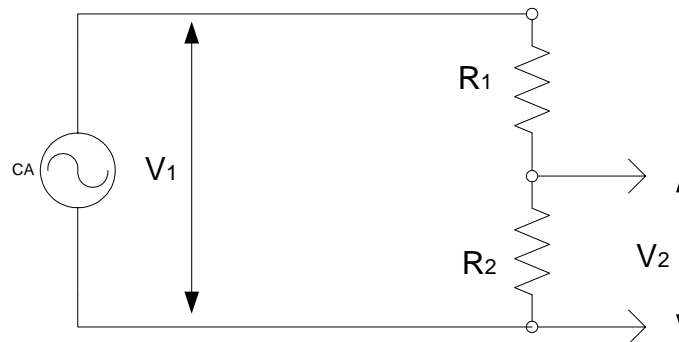


Figura 2.11 Esquema de un Divisor de Corriente.

El divisor de voltaje es un método apropiado únicamente para sensar tensión eléctrica en baja potencia, debido al uso de elementos resistivos. Es aplicable tanto para corriente alterna, como para corriente continua. La configuración de divisor se puede conectar en cascada en función de la disminución de tensión deseada, sin embargo el error se multiplica en función de la incertidumbre asociada a cada valor de impedancia.

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 \quad (2.1)$$

Transformador de Voltaje [24].

El transformador de voltaje consiste de dos o más devanados enlazados por un campo magnético. El devanado conectado a una fuente de voltaje alterna (V_1) se denomina primario. En él se produce un flujo magnético que

enlaza al devanado secundario e induce sobre él un voltaje (V_2) cuyo valor depende del número de espiras (N) de los devanados. La relación entre el número de vueltas de los devanados o entre los voltajes primario y secundario se conoce como relación de transformación. En un transformador ideal, la potencia de entrada es igual a la potencia de salida y se cumplen las siguientes expresiones:

$$P = V_1 * I_1 = V_2 * I_2 \quad (2.2)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.3)$$

En el mercado se puede encontrar una amplia gama de transformadores que va desde transformadores pequeños para niveles de bajo voltaje aplicables en circuitos de electrónica y control, hasta grandes transformadores aplicables a niveles de media y alta tensión con alta potencia. Debido a esto y a la facilidad de funcionamiento, el transformador de voltaje es uno de los dispositivos de uso más frecuente como sensor de voltaje en corriente alterna. Otra de las ventajas de este dispositivo es que provee aislamiento entre el primario y el secundario.

Se debe tomar en cuenta que el secundario debe estar conectado a una impedancia de valor alto, de modo que la corriente que por él circule sea la menor posible, ya que el error en la amplitud del voltaje secundario se ve afectada por el efecto de la corriente del secundario y de la de magnetización.

Resumen de Sensores de Voltaje

Si bien los dos métodos analizados tienen excelentes resultados para la medición de voltaje, existen características inherentes a cada método que

podrían marcar la diferencia al momento de elegir uno de ellos. La Tabla 2.3 presenta las propiedades de cada sensor, lo que permitirá compararlos a fin de escoger el más adecuado para los requerimientos del proyecto.

Tabla 2.3 Características de los sensores de voltaje.

| | Divisor de Voltaje Resistivo | Transformador de Voltaje |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Costo | Bajo | Variable Según Potencia |
| Linealidad en el Rango de la Medición. | Muy buena | Buena |
| Capacidad de Medición en Alta Potencia. | No | Si |
| Saturación de Corriente DC. | No | Si |
| Variación de la Salida con Respecto a la Temperatura. | Medio | Bajo |
| Problema de Saturación e Histéresis. | No | Si |
| Provee Aislamiento respecto de la Fuente de Tensión. | No | Si |

2.2.4 REQUERIMIENTOS DEL SENSOR DE VOLTAJE.

Para la implementación del proyecto, el sensor de voltaje debe cumplir con las siguientes características:

- Debe ser capaz de sensor el voltaje de alimentación al motor, que para una red en bajo voltaje puede ser 208/120 V.
- La señal de salida deberá conservar todas las características de la señal de voltaje sensada (voltaje de alimentación al motor).
- La señal de salida del sensor debe poder ser acondicionada a un nivel de voltaje compatible con el sistema de adquisición.
- Debe tener un ancho de banda de 0-500 Hz mínimo (Sección 2.3.2)

2.3 ADQUISICIÓN DE SEÑALES.

La adquisición de datos tiene por objeto digitalizar la señal análoga del transductor y enviarla al computador.

Lamentablemente, esta tarea no es tan simple como pudiera parecer, ya que se debe tomar en cuenta los factores internos y externos que envuelven una medición, de manera que se obtengan datos exactos, confiables y libres de ruido. La manera que se va a implementar el sistema de adquisición depende de la clase de señal a estudiar, de modo que se pueda elegir la mejor manera de trasladarla y de digitalizarla.

2.3.1 SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

La mayor parte de sistemas de adquisición en la actualidad están basados en PC, o en algún tipo de microprocesador que se adapte a un conversor Analógico-Digital (A/D) y transfiera sus lecturas a una memoria externa.

Algunos instrumentos necesariamente requieren de una PC que sirva como *host*, mientras otros pueden funcionar independientemente y pueden tener eventualmente una transferencia de datos a un computador.

Para el sistema se ha tenido en cuenta varias opciones de adquisición que se analizan a continuación:

Sistemas basados en PC [25]

Los sistemas basados en PC tienen básicamente dispositivos encajados en dos categorías importantes: *Internos* y *Externos*.

Los *dispositivos internos* son tarjetas *Plug-in* compatibles con buses ISA o PCI. En la actualidad el bus ISA está obsoleto porque no tiene un buen desempeño ya que no es compatible con altas velocidades ni con sistemas operativos de 32 o 64 bits, por lo que casi en su totalidad, los dispositivos internos son diseñados como tarjetas *Plug-in* PCI de 64 bits.

Las tarjetas *Plug-in* están dentro de la PC y ofrecen una alta velocidad de adquisición por su conexión directa al bus de datos, además, tienen un beneficio en cuanto a costo ya que el empaquetado y energizado está proveído por la propia PC. Cada tarjeta es direccionada con una única locación en el *mapa de entrada/salida (E/S)* del sistema.

El espacio limitado en la tarjeta madre y dentro de la carcasa restringe el número de canales de entrada aunque algunos sistemas han sido expandidos con chasis de *E/S* o módulos especiales para tarjetas.

Uno de los inconvenientes de estos dispositivos es que están en un ambiente que favorece al ruido eléctrico que puede afectar a señales de bajo nivel.

Los *dispositivos externos* se han creado debido a que las PCs portátiles, como las *Laptop*, *PDA*s o *PALMs* carecen de ranuras (*slots*) de expansión, por lo que se necesita un sistema de adquisición externos que se pueden clasificar por la comunicación a la PC que utiliza: Puerto Paralelo, Puerto Serial, PCMCIA, Puerto USB.

Las computadoras modernas tienen algunos puertos para dispositivos externos, por ejemplo el puerto paralelo de la impresora se ha utilizado para comunicación con nuevos instrumentos como osciloscopios y multímetros. El

Puerto serial se incluye en casi todas las máquinas y es capaz de utilizar el estándar RS-232. Por lo general en los computadores portátiles se encuentran los *slots* para PCMCIA, y para los USB que se encuentran difundidos en casi todas las computadoras personales.

Tabla 2.4 Características de tipos de Sistemas de adquisición de datos basados en PC

| TIPO | MEDIO | CARACTERÍSTICAS |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dispositivos Internos | Tarjetas <i>Plug-in</i> | Velocidad más rápida posible, no portátil, instalación relativamente complicada. |
| Dispositivos Externos | Puerto Paralelo | Velocidad rápida, portátil, fácil expansión de canales y conexión de señal. |
| | Puerto Serial | Velocidad lenta, portátil, fácil conexión de señal. |
| | Tarjetas PC (PCMCIA) | Velocidad media a rápida, muy portátil, canales y conexión de señal limitados. |
| | Puerto USB | Velocidad variable de acuerdo a versión, autoinstalable en momento de conexión, muy portátil, fácil conexión de señal |
| Dispositivos Independientes | Registrador de datos | Baja velocidad, portátil, conexión de señal fácil, no se necesita PC en el sitio de prueba. |
| Interfaces | PC a IEEE 488, etc. | Velocidad de transferencia baja, capacidades dependen del instrumento específico |

Los **sistemas de adquisición basados en puerto paralelo** pueden tener algunos cientos de canales de E/S, que pueden ser trasladados de una PC a otra con facilidad, y además permite compartir el puerto con una impresora o escáner. Los dispositivos de adquisición pueden tener velocidades de hasta 1 MHz con conversores A/D con resolución de 12 o 16 bits. Además, a través de adaptadores a un bus IEE-488, pueden proveer una interfase de cientos de instrumentos de medida existentes.

Los **sistemas de adquisición de puerto serial** no son tan comunes debido a las limitaciones de velocidad, pero existen bastantes opciones de larga distancia y aislamiento que no se pueden implementar en otro puerto. Estos sistemas son necesarios para implementar adquisiciones en lugares distantes de hasta 50 pies con el estándar RS-232 y hasta 5000 pies con RS-485, e inclusive cualquier distancia con fibra óptica.

Para los **dispositivos PCMCIA** se encuentran resoluciones de 12 o 16 bits, y una velocidad relativamente alta de transmisión, pero la limitación sigue siendo la física en cuanto al espacio que ocupan dentro del computador.

Ahora se han vuelto muy populares los **sistemas de adquisición basados en puertos USB**. USB tiene varias versiones siendo la más actual y rápida la versión 2.0 que permite una alta velocidad de transmisión. En la versión 1.1 USB puede transmitir a 1,5 Mbits/s y a 12 Mbits/s elegible al usuario, pero en 2.0 la transmisión puede hacerse hasta a 480 Mbits/s que es útil inclusive para hacer aplicaciones sencillas en tiempo real. Esta velocidad puede competir con la velocidad de FireWire. USB también puede energizar el instrumento desde el computador.

Sistemas Autónomos.

Los sistemas autónomo, también llamados “Registadores de datos” o en inglés *Data Logger*, están saliendo de uso. En esta categoría están las cartas de registro u otros dispositivos que dé resultados en papel impreso al tiempo de prueba. Estos tienen muchas dificultades en cuanto a la operación en el área

de trabajo, y al mantenimiento. Por eso, en su mayoría han sido cambiados por sistemas basados en PC.

También existen nuevos dispositivos que utilizan una memoria interna y un microprocesador integrados en una sola tarjeta que conjuntamente pueden hacer adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos. Estos están basados en microcontroladores, DSPs y sensores de alta precisión y poco tamaño. Usualmente tienen la opción de elaborar resultados en pantallas integradas y además se pueden comunicar a un *host* externo vía ethernet, o a través de los puertos señalados anteriormente para descargar los datos y liberar la memoria.

Estos últimos son llamados también ***Sistemas de Adquisición basados en Comunicación.***

En general un sistema de adquisición debe ser escalable, confiable y estandarizado de manera que se pueda reutilizar en varias aplicaciones de la misma naturaleza.

2.3.2 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN

Las consideraciones generales que se debe tomar en cuenta para la realización del proyecto son las siguientes:

- Amplitud de la señal de entrada.
- Frecuencia Máxima de señal.
- Ancho de Banda.
- Tipo de conversor Analógico-Digital (ADC).

- Rango y resolución del ADC.
- Relación señal a ruido de cuantización. (SQNR)
- Muestreo.
- Filtro *Anti-aliasing*.
- Configuración de la señal de entrada al ADC.
- Fuentes de Ruido.

Estas consideraciones se detallan a continuación.

Amplitud de la entrada.

Debido a las características de la señal, que es una onda de superposición de sinusoidales y que por las características de los filtros *anti-aliasing* (sección 3.5.1), debe estar limitada entre ± 15 V, la entrada al sistema de adquisición debe estar lista a recibir este rango.

Frecuencia máxima de la señal.

Debido al algoritmo de MCSA para este caso (ecuación 1.8), la frecuencia del pico de cortocircuito máxima teórica se encuentra cuando el deslizamiento es 0. De ahí que $f_{sm\acute{a}x} = 60 * (5 / p * 2 * (1 - s) + 1) \Big|_{s=0, p=2} = 360Hz$

Ancho de banda.

El ancho de banda del sistema de adquisición no puede permitir que haya ganancia negativa en las frecuencias de interés ya que su amplitud determina el diagnóstico del motor. Es decir, que el sistema no puede permitir que haya una atenuación de -3dB en 360 Hz ya que esto puede generar un

diagnóstico erróneo. De esta manera, es conveniente que la frecuencia de corte del sistema de adquisición esté entre los 400 y 500 Hz para asegurar que se evite cualquier tipo de pérdidas en las bandas inferiores. Se escogerá 500 Hz.

Conversor Analógico-Digital (ADC).

El ADC puede ser Flash, que tiene un buen rendimiento en cuanto a velocidad pero tiene alto costo, y puede ser también de aproximaciones sucesivas que toma un mayor tiempo en la digitalización.

En la implementación del proyecto, puede utilizarse cualquiera de los dos tipos de ADC, ya que la alta velocidad de transformación no será imprescindible y la frecuencia de trabajo no se acercará a la frecuencia de corte del dispositivo ya que es en banda base (500 Hz).

Rango y Resolución del ADC.

El *rango* del dispositivo debe concordar con los requerimientos del sistema de adquisición. De aquí que la entrada al ADC debe ser de -15 a 15 V y el dispositivo debe tener un rango entre estas mismas proporciones.

La *resolución* del dispositivo es determinada por el número de bits de salida del ADC:

$$R = \frac{D}{2^N} \quad (2.4)$$

donde:

R: Resolución dada en Voltios.

D: Rango dinámico de la señal en Voltios.

N: Número de bits del conversor ADC.

Debido a que la amplitud de entrada al sistema de adquisición está entre -15 y 15 voltios, el rango dinámico es 30 V y será necesario un dispositivo con un mínimo de resolución de 12 bits, de manera que:

$$R = \frac{30V}{2^{12}} = 7,32mV \text{ máximo.}$$

Lo que quiere decir que el mínimo valor a ser leído es 7,32 mV y que se puede tener una *relación señal a ruido de cuantización (SQNR)* cuya expresión simplificada es:

$$SQNR = 20 \log\left(\frac{D_{señal}}{D_{ruido}}\right) = 20 \log\left(\frac{D_{señal}}{R}\right) = 6.02 * N \quad (2.5)$$

Donde:

N: Número de bits del conversor ADC.

De la ecuación anterior se obtiene que el SQNR es de alrededor de 72 dB que sería a causa de la resolución del dispositivo de 12 bits.

Muestreo

La *velocidad de muestreo* depende de la frecuencia máxima que se quiera analizar. Para esta consideración se debe tomar en cuenta el teorema de Shannon de muestreo [26] para evitar el fenómeno de “*Aliasing*”. Es decir que “la frecuencia de muestreo mínima debe ser por lo menos el doble de la frecuencia de Nyquist”. Teóricamente, la frecuencia de Nyquist es la máxima frecuencia de interés.

Es decir, ya que la máxima frecuencia a muestrear es de 500 Hz, la frecuencia mínima teórica de muestreo ideal debería ser 1kHz o muestras por segundo (*Samples per second: S/s*), pero en la práctica, es recomendable que

la frecuencia de muestreo sea mínimo de cinco a ocho veces la frecuencia mínima, esto es el rango entre 2,5 y 4 kS/s.

El *método de muestreo* puede variar y ser: *Simultáneo* cuando se tienen dos señales en las que su sincronización en el muestreo es crítico; *por intervalo*, cuando la sincronización no es crítica y las señales son de muy baja frecuencia como las de presión y temperatura; *continuo*, que toma muestras de cada canal a una tasa constante a través de un multiplexor analógico; *aleatorio entrelazado*, utilizando digitalizadores de alta velocidad de manera que el sistema aparente tener una tasa de muestreo mayor a la real; *multiplexación / conmutación* en donde un multiplexor selecciona un canal y dirige su información al ADC para la digitalización y después selecciona otro canal [27].

Ya que existen dos canales, y que la simultaneidad de la medición no es crítica pero si es necesaria, el proyecto puede utilizar el muestreo simultáneo, o por multiplexación que pueden ser los más óptimos para adquirir señales de voltaje y corriente.

Para este proyecto se obtendrán 6400 muestras por canal. La justificación de esto se encuentra detallada en la sección 2.4.4.

Los datos obtenidos se almacenan dependiendo de la arquitectura del sistema, ya sea en una memoria interna o puede ser por acceso directo a memoria (*Direct Memory Access, DMA*) a través de un multiplexor que envía los datos directamente a la memoria RAM del computador.

En este caso, por la arquitectura del proyecto y por el algoritmo de detección, se necesita un dispositivo que tenga al menos dos canales de lectura o entrada analógica (AI) para señales de voltaje y corriente. Estos deben tomar datos en muestreo simultáneo o por multiplexación, determinando el número de muestras a leer. Debe haber dos bits de escritura digital para encendido y apagado del motor y del circuito que conecte la señal de corriente con la lectura de la señal de corriente para evitar daños por la sobrecorriente de arranque. El sistema se expone de forma detallada en el Capítulo 3.

Filtro *Anti-Aliasing*.

Para evitar cualquier tipo de señal análoga parásita que tenga una frecuencia mayor a la frecuencia de Nyquist y aparezca en el espectro digital por el efecto de *Aliasing*, se debe poner a la entrada un filtro analógico tipo pasabajas de manera que se tenga una atenuación a nivel de ruido de cuantización en la frecuencia de Nyquist.

Las opciones para la topología de este filtro son en general: Butterworth, Chebyshev I, y Bessel. Las características de cada uno de estos son las mismas que en los filtros digitales que constan en la sección 2.4.2.

Ya que es importante que la respuesta sea lo más lineal posible en la banda de paso, y que la banda de transición debe ser lo más angosta posible, la topología a ser usada debe ser Butterworth de mínimo cuarto orden. La frecuencia de corte del filtro puede coincidir con el ancho de banda del sistema de adquisición, esto es alrededor de 500 Hz. El filtro debe llegar a tener una atenuación a nivel de ruido de cuantización a $f_s/2$. Esto es -72 dB entre los valores de 1,25 -2 kHz [28] (Sección 2.4.4).

Configuración de señal de entrada al dispositivo

Existen varias opciones para el tipo de señal a adquirir por ejemplo: *referida a tierra y diferencial* o *flotante*. De esto dependerán las dificultades de implementación de hardware y las limitaciones en cuanto a rango y sensibilidad a los diferentes tipos de ruido que puedan presentarse. [29]:

Si se trabaja con *señales referidas a tierra*, existe la posibilidad de tener “lazos de tierra” que causen mediciones erróneas e inclusive el daño del equipo de adquisición. Además, la referencia de una señal referida a tierra debe ser conectada a la tierra del sistema común para no tener diferencia de voltaje entre la tierra analógica y la tierra del sistema de adquisición. De existir, esta pudiera no estar en nivel de DC, lo cual da como resultado una medición ruidosa afectando la exactitud del sistema. Por otra parte, si se conecta una señal en modo no diferencial, se reduce el rango máximo de operación del dispositivo.

Si se trabaja con *señales flotantes* hay beneficio en la etapa de amplificación previa por el rechazo de ruido en modo común. Además, con una configuración correcta de hardware de entrada, se puede conseguir que no exista saturación en los niveles altos y bajos por diferencia de potencial entre la tierra analógica y la tierra digital sin necesidad de conectarlas directamente y evitando así, lazos de tierra.

Es por lo expuesto anteriormente que se implementa el sistema de adquisición del proyecto en modo diferencial con las consideraciones para evitar que ingresen los diferentes tipos de ruido que se analizan a continuación.

2.3.3 FUENTES DE RUIDO EN EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN

Aunque un sistema de adquisición evite lazos de tierra y la saturación en modo diferencial, existen otros tipos de fuentes de ruido inherentes al ambiente. Esto es especialmente considerable cuando se trabaja con señales de bajo nivel (menor que 1V), pero se debe tomar en cuenta que las señales con las que se trabaja en el proyecto son de alto nivel (15V)

Se puede observar múltiples fuentes de ruido así:

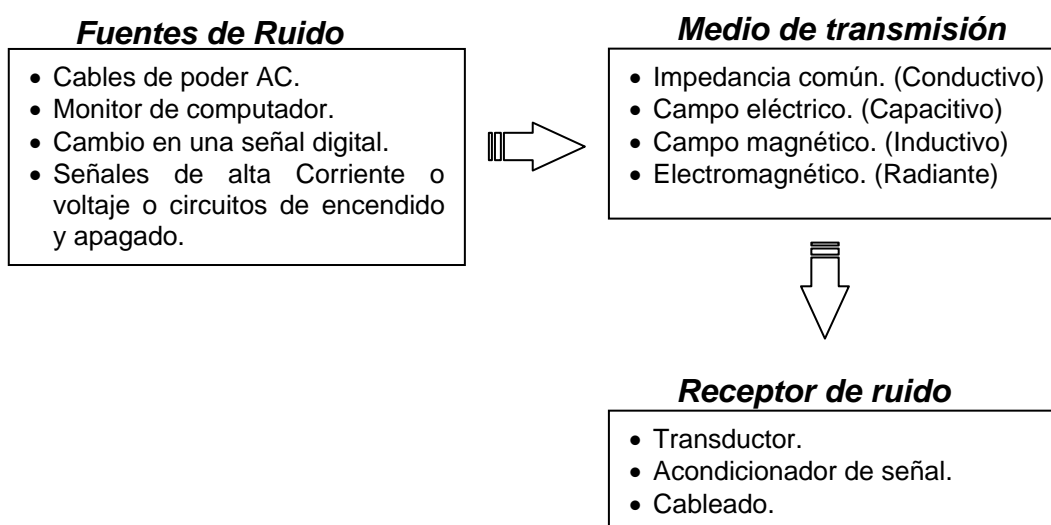


Figura 2.12. Fuentes, medios y transmisión de Ruido

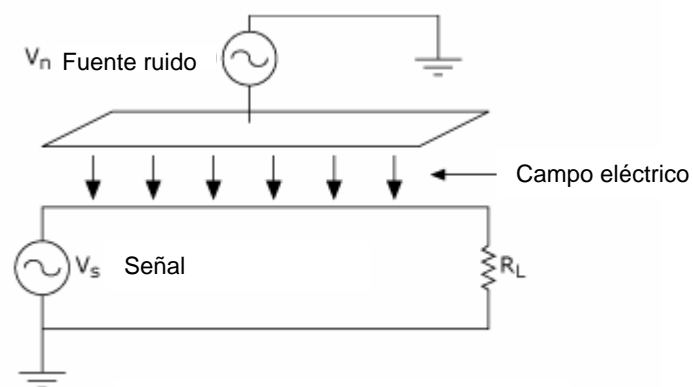
Fuentes de Ruido.

Ruido conductivo.

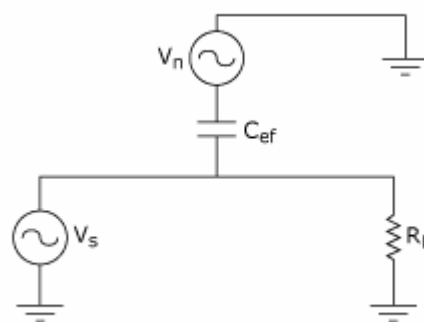
Este surge por el hecho de que los cables de conexión no tienen impedancia cero, sino que tienen una resistencia pequeña, y cuando se trabaja con magnitudes de alto voltaje y corriente las pérdidas en ellos no se hacen despreciables, pero, como la señal de entrada al sistema de adquisición será de máximo ± 15 V y unidades de miliamperios, las pérdidas pueden no tomarse en cuenta.

Ruido Capacitivo

La representación de este tipo de ruido viene dada por las ecuaciones de Maxwell que dicen que fenómenos magnéticos se relacionan con campos eléctricos y viceversa. Este ruido tiene una equivalencia circuital:



a. Representación física



a. Equivalente circuital

Figura 2.13. Equivalente circuital del Ruido Capacitivo.
Gráfica de *Developer Zone*. 2006

El ruido capacitivo puede entrar por la influencia de lámparas fluorescentes en el ambiente de trabajo, por la ionización del ambiente e inclusive por el clima lluvioso.

La capacidad es directamente proporcional al área de influencia e inversamente proporcional a la distancia entre los dos circuitos. Entonces

minimizando el área de los cables, esto es, hacerlos pequeños y cortos y separándolos lo más posible de las fuentes de ruido capacitivo se puede minimizar el efecto de este tipo de ruido. Otra opción es forrar los cables y conectar físicamente ese forro a tierra solo en la Terminal cercana a la fuente de la señal.

Ruido Inductivo

De la misma manera que el ruido capacitivo, el hecho de que circule corriente a través de un cable, genera un campo magnético que puede ser inducido en parte del sistema.

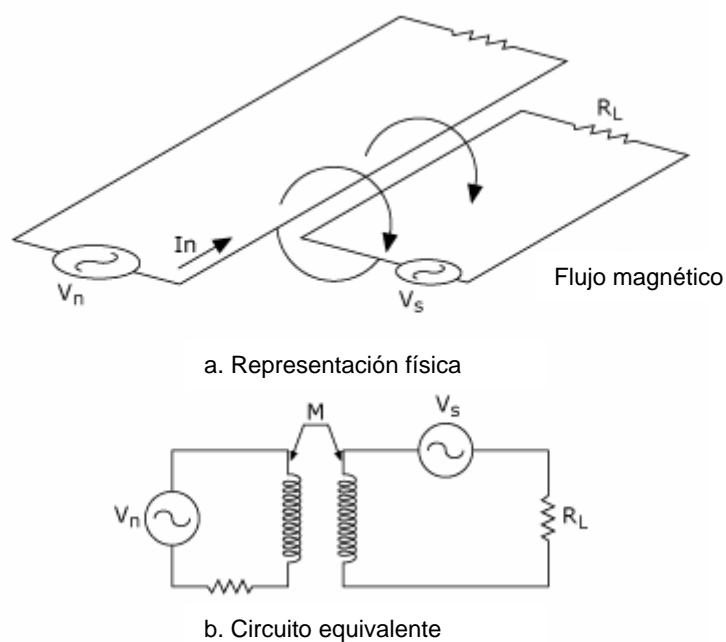


Figura 2.14. Representación Circuital de Ruido Inductivo. Gráfica de *NI Developer Zone*. 2006

El ruido más común es el de 60 Hz ya que el motor, y todos sus campos magnéticos internos, trabajan a esa frecuencia, pero ya que el análisis obtendrá una componente grande en esa frecuencia no habrá que hacer un

filtro tipo *Notch*, ya que la frecuencia fundamental absorberá el ruido a esa frecuencia. Pero para evitar ruido en los armónicos de la fundamental de 60 Hz y en otras frecuencias no deseadas, se deberá utilizar pares trenzados en la implementación del equipo.

Ruido Radiante.

Esta se produce por la influencia básicamente de señales de radio, televisión y telefonía, en donde los cables a usar pueden funcionar como antenas. Claro que estos ruidos no influirán directamente sino solo en alta frecuencia, pero pueden afectar en baja frecuencia cuando están rectificadas en un fenómeno llamado *rectificación de audio*. Esto puede ocurrir en las juntas no lineales de algunos ICs que funcionan como rectificadores. El ruido radiante se puede evitar poniendo redes R-C pasabajas en la Terminal del receptor.

Ruido de Cuantización.

El ruido de cuantización viene implícito en el proceso de digitalización de las señales. Como se aclaró en la sección 2.3.2, la SNR de cuantización deberá ser por lo menos 74 dB por la resolución mínima de 12 bits que se requiere en el conversor A/D

2.3.4 ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN

En resumen, las características elegidas para la implementación son:

- Sistema de adquisición que utilice una interfase USB.
- El sistema debe tener un rango de $\pm 15V$ y una resolución mínima de 12 bits.
- El ADC puede ser por aproximaciones sucesivas o flash.
- El sistema debe ser capaz de muestrear en el rango de 2,5 – 4 kS/s y enviar los datos a una PC, preferiblemente con DMA.
- Debe tener dos canales de entrada analógica con muestreo simultáneo o por multiplexación, y dos de E/S digitales.
- De ser capaz de recibir señales diferenciales con protección de sobresaturación en límites alto y bajo.
- Las conexiones deben tener aislamiento capacitivo conectado a tierra, ser en par trenzado y de ser necesario, deben ser implementados filtros pasabajas análogos.

2.4 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

En este bloque, se requiere implementar tres tareas:

- Eliminación de periodicidad en frecuencia por efecto de muestreo.
- Eliminación de ruido y componentes parásitas en la señal.
- Procesamiento del espectro de la señal.

2.4.1 ELIMINACIÓN DE PERIODICIDAD EN FRECUENCIA.

Debido a que un muestreo de una señal analógica introduce en frecuencia una repetición del espectro centrado en n veces la frecuencia de muestreo ($n=1,2,3\dots$), es indispensable utilizar un filtro digital pasabajas con una atenuación a nivel de ruido en por lo menos la frecuencia de muestreo sobre dos [26]. Con esto se logra anular frecuencias que aparecen en la representación digital de la señal pero que no existen en realidad.

El diseño de este filtro puede coincidir con el de la eliminación digital de ruido y componentes parásitas.

2.4.2 ELIMINACIÓN DIGITAL DE RUIDO Y COMPONENTES PARÁSITAS.

A pesar de todas las consideraciones de hardware que se tomen para evitar los diferentes tipos de ruido, es recomendable, re-procesar digitalmente la señal para eliminar cualquier ruido remanente.

En general existen algunas ventajas en realizar un filtrado digital comparado con un filtrado análogo, a saber [30]:

- Los filtros digitales son programables por software, siendo fáciles de construir y probar.
- Los filtros digitales solo necesitan de operaciones aritméticas de suma/resta y multiplicación.
- Los filtros digitales no son afectados por temperatura o humedad y no necesitan de componentes de precisión.
- Los filtros digitales tienen una relación beneficio-costos bastante alto.
- No son afectados por variaciones de manufactura o por tiempo de uso.

El proceso de tratar a la señal digital se realiza en las siguientes etapas:

- Elección de un filtro digital.
- Configuración del filtro según requerimientos.
- Implementación digital.

El ruido usualmente se elimina con filtros tipos pasabajas, o pasaaltas, dependiendo de cual sea la frecuencia aproximada en las que se manifiesta.

Filtros digitales.

Los filtros digitales se clasifican de modo general en:

- Filtros de Respuesta Impulsiva Finita (FIR), también conocidos como de Promedio Desplazante o del inglés *Moving Average* (MA)
- Filtros de Respuesta Impulsiva Infinita (IIR), también conocidos como promedio desplazante autoregresivo (ARMA).

Filtros de Respuesta Impulsiva Finita

Operan con los valores de secuencia de entrada presentes y anteriores y son los más fáciles de diseñar teóricamente. Estos filtros también son conocidos como filtros no-recursivos, filtros de convolución o de promedio desplazante por el algoritmo de implementación.

Este realiza una convolución de los coeficientes del filtro con una secuencia de entrada y produce una secuencia de salida del mismo número de elementos. La ecuación que define la convolución finita de un filtro FIR se define como:

$$y_i = \sum_{k=0}^{n-1} h_k x_{i-k} \quad (2.6)$$

donde x es la secuencia de entrada, y la salida y h los coeficientes del filtro.

Los filtros FIR tienen las siguientes características:

- La respuesta impulsiva de un filtro FIR decae a cero en un tiempo finito.
- Pueden lograr respuesta de fase lineal por la simetría de los coeficientes en la realización.
- Siempre serán estables.
- Se filtra a través de convolución.

Filtros de Respuesta Impulsiva Infinita

Operan con los valores de secuencia de entrada presentes y anteriores y con los valores de la secuencia de salida presentes y anteriores.

Teóricamente, la respuesta impulsiva de un filtro IIR nunca decae hasta cero, pues será una secuencia de longitud infinita de valores que se le aproximen.

La ecuación que caracteriza estos filtros es:

$$y_i = \frac{1}{a_0} \left(\sum_{j=0}^{N_b} b_j x_{i-j} - \sum_{k=1}^{N_a-1} a_k y_{i-k} \right) \quad (2.7)$$

Donde b_j es el conjunto de coeficientes en adelanto, N_b el número de coeficientes de adelanto, a_k es el conjunto de coeficientes de atraso y N_a es el número de coeficientes de atraso. Usualmente a_0 es 1.

Los filtros IIR en la práctica tienen las siguientes características:

- La respuesta impulsiva de un filtro IIR decae a un valor cercano a cero en un tiempo finito.
- No pueden lograr respuesta de fase lineal.
- Pueden tener rizo en las bandas de paso y de supresión.

Haciendo una comparación entre ambas clases de filtros para su elección se puede decir que los filtros IIR pueden lograr el mismo nivel de atenuación que los FIR con muchos menos coeficientes; de ahí que se pueden implementar para respuestas más rápidas en el computador.

Los filtros FIR pueden ser diseñados para tener respuesta de fase lineal mientras que los IIR no.

Tomando en cuenta las características anteriormente mencionadas, y teniendo en cuenta que al proyecto, debido al algoritmo en el que no interviene la fase de las señales, y que es preferible tener los resultados lo más rápido posible, *se deberán implementar filtros de tipo IIR.*

Características de los filtros IIR.

Los filtros IIR algunas veces son sensibles a errores introducidos por los efectos de cuantización y por límites computacionales.

Orden y topologías de los filtros IIR.

El orden del filtro es proporcional a la longitud del conjunto de coeficientes. Mientras el número de coeficientes aumenta, el orden aumenta. Si esto ocurre, el filtro se vuelve cada vez más inestable aunque la banda de transición se vuelve más fina o de ser el caso, los rizados en las bandas de paso y de rechazo se vuelven más grandes y aumentan en número.

Las topologías de los filtros IIR son:

- Tipo Butterworth.
- Tipo Chebyshev.
- Tipo Chebyshev II o inverso.
- Eliptico o tipo Cauer.
- Tipo Bessel.

Filtro tipo Butterworth.

Figura 2.15a. Sus características son:

- Respuesta suave, plana en todas las frecuencias.
- Decrecimiento monótonico desde las frecuencias de corte especificadas.
- Es la más plana en las bandas de paso y de supresión con una amplitud de la unidad y cero respectivamente.
- La frecuencia de media potencia corresponde a la frecuencia de corte.
- A veces puede no tener un buen desempeño cuando la banda de transición es grande en filtros de orden bajo.

Filtro tipo Chebyshev.

Figura 2.15b. Sus características son:

- Minimización de error pico en la banda de paso.
- Existe rizado en la magnitud de la respuesta en la banda de paso.
- Decrecimiento monótonico en la magnitud en la banda de rechazo.
- Banda de transición más fina que en filtros Butterworth.
- Puede ser ejecutado en un tiempo menor al Butterworth.

Filtro tipo Chebyshev II

Figura 2.15c. Tiene todas las características del Chebyshev pero tiene otras adicionales:

- Minimiza el error pico en la banda de supresión en lugar de en la banda de paso.
- El rizo aparece en la banda de supresión en vez de en la banda de paso.
- Decrecimiento monótonico en la magnitud en la banda de paso en lugar de en la banda de supresión.

Filtro tipo Elíptico.

Figura 2.15d. Sus características son:

- Minimización de error pico en banda de paso y de supresión.
- Rizo tanto en banda de paso como de supresión.
- Produce una banda de transición más angosta que la de Chebyshev y Butterworth.

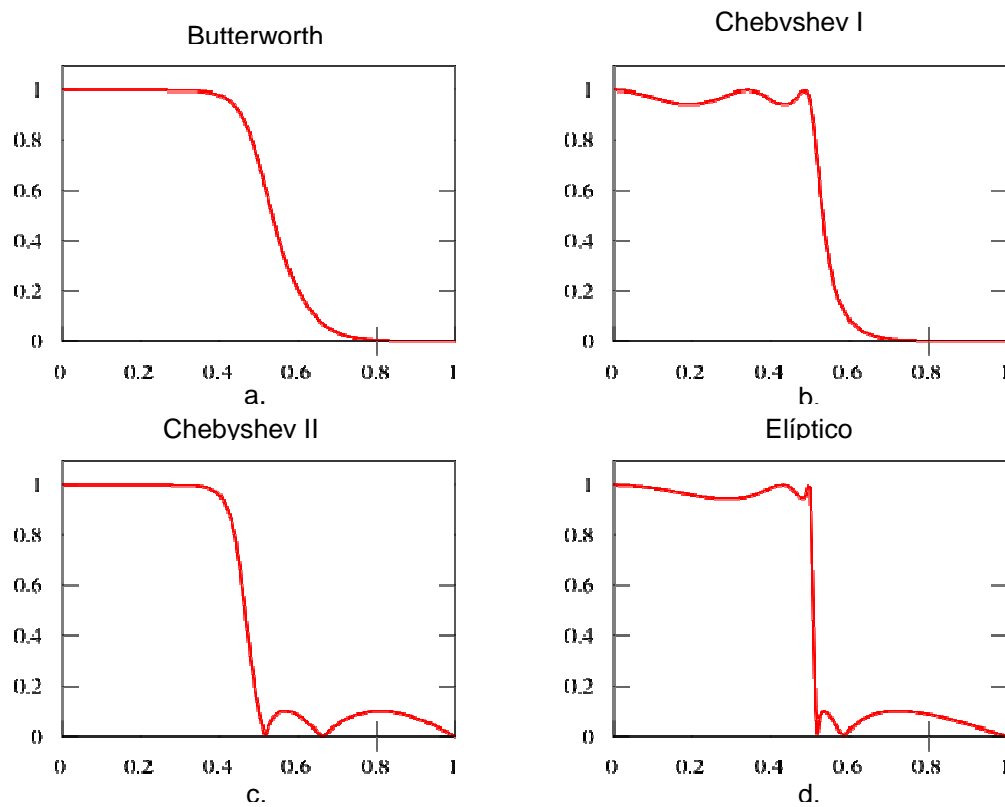


Figura 2.15. Respuestas en frecuencia típicas de filtros tipo: a) Butterworth, b) Chebyshev I, c) Chebyshev II, d) Elíptico [37]

Filtro tipo Bessel

Sus características generales son:

- Respuesta plana máxima en magnitud y fase.
- Respuesta casi de fase lineal en la banda de paso.

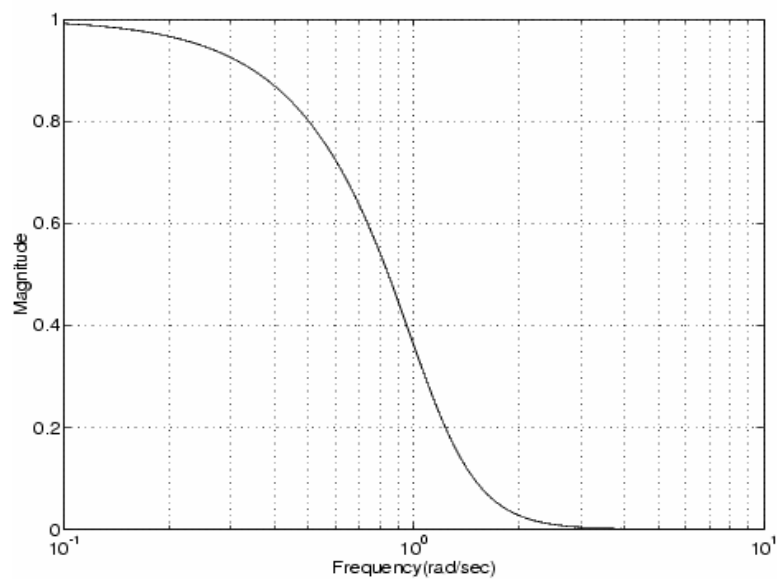


Figura 2.16. Respuesta en frecuencia típica de filtros tipo Bessel. [38]

Ya que el sistema del proyecto necesita que la respuesta en banda de paso sea lo más plana posible y que el error en ésta sea el mínimo, además de que la banda de transición no necesita ser muy angosta y la fase de respuesta en frecuencia no es analizada en ningún caso, la mejor elección es la de escoger un filtro IIR, tipo pasabajas de topología Butterworth de segundo o máximo cuarto orden en los que la frecuencia de corte sea $f_s/2 = 500$ Hz. Con esto se filtra cualquier ruido de alta frecuencia y cualquier alias producido por los armónicos de 60 Hz que puedan estar sobre la frecuencia de Nyquist u otras componentes parásitas, además de eliminar la periodicidad en frecuencia

2.4.3 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE SEÑALES [3].

Las técnicas del procesamiento de señales digitales son aplicadas a las que son entregadas por los sensores y han sido previamente acondicionadas y filtradas de manera que se pueda conseguir ciertos parámetros o comportamientos que permitan describir un fenómeno, en este caso, una falla del motor. Estas son, en general, las siguientes:

- Análisis por Raíz Cuadrática Media, RMS (*Root Mean Square*).
- Análisis en frecuencia.
- Otros métodos de análisis en frecuencia.
- Estadísticas de Orden Superior.
- Vector de *Park* de la corriente del estator.

El **Análisis por RMS** conlleva un cálculo estadístico simple de la raíz cuadrática media, que en el caso de analizar vibraciones, da una idea de cuan severa puede ser una falla que tenga este tipo de síntoma, o en caso de ser el

valor RMS de la corriente de un estator, da una idea clara de la carga a la que está sometido el motor. La información que lleva este análisis suele ser algo ambiguo en cuanto a detalles específicos en los que intervienen factores externos no controlados.

El **análisis en frecuencia** se la realiza comúnmente usando la transformada de Fourier, sobretodo para diagnósticos en línea. Muchas de las fallas, mecánicas o eléctricas pueden identificarse en algún lugar del espectro de frecuencia, que dependen de parámetros conocidos como el número de polos y la velocidad de funcionamiento. La señal a ser detectada deberá ser proporcional de alguna manera al comportamiento de estas variables. Además, puede dar información sobre el número de fallas y la severidad de las mismas. Asimismo, se pueden diferenciar, a través de este método, las fallas que tengan señales de bajo nivel pues con el análisis de Fourier se separa el ruido a altas frecuencias. Puede ser medido a través de las formas de onda de corriente y voltaje que existen en el motor.

Otras formas de análisis en frecuencia toman en cuenta que la transformada de Fourier asume que las componentes espectrales varían con respecto al tiempo, lo cual no es cierto cuando se tienen cargas mecánicas variables, por ejemplo en trituradoras. Estas técnicas varían del análisis por *wavelets*, [31] o la JTFA (*Joint Time-Frequency Análisis*) [32] que implican una mayor complejidad de cálculos y de procesos computacionales.

Las **estadísticas de orden superior** usan elementos como la media o varianza que pueden describir la función de densidad de probabilidad (PDF)

que a su vez, puede sintetizar el comportamiento de una señal en el tiempo. Algunos de estos elementos tienen la ventaja de ser inmunes al ruido gaussiano.

El **Vector de Park de la corriente de estator** es basado en la suma de los vectores espaciales instantáneos de las corrientes trifásicas del estator, pero ya que el motor a estudiar es monofásico una adaptación de este método es poco conveniente.

Analizando los conceptos anteriores y ya que el algoritmo de MCSA necesita de análisis en frecuencia, se debe implementar la transformada de Fourier, que en este caso es la mejor opción, ya que no se necesita un análisis de frecuencia en el tiempo pues se supone que las señales a estudiar son estacionarias.

2.4.4 ANÁLISIS EN FRECUENCIA.

El hablar en el sistema de análisis en frecuencia de la señal adquirida y filtrada, se refiere implícitamente a trabajar con la transformada de Fourier.

Teóricamente, la transformada de Fourier transforma una señal continua en el dominio del tiempo en otra continua en el dominio de la frecuencia.

Prácticamente, en el análisis por computadora, hay que referirse al algoritmo equivalente en tiempo discreto: La Transformada discreta de Fourier (DFT) que establece la relación entre una señal discreta en el dominio del tiempo y una señal discreta en el dominio de la frecuencia.

Ahora, implementar la DFT directamente en N muestras requiere aproximadamente N^2 operaciones complejas en un proceso que consume

mucho tiempo. Para esto computacionalmente se aplica el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT), que toma aproximadamente $N \log_2(N)$ (si N es potencia de 2) operaciones que hace el cálculo de la DFT mucho más rápido.

Características de la FFT.

Frecuencia de muestreo.

Como se mencionó en la sección 2.3.2, la frecuencia de muestreo debe ser entre 2 y 4 kS/s. Debido a las posibilidades tecnológicas de acceso a equipo que muestrea a una frecuencia alta, se puede elegir 4 kS/s.

Número de muestras:

El espectro resultante está completamente determinado por el tiempo de adquisición y la frecuencia, así:

$$T = \frac{N}{f_s} \quad (2.8)$$

donde:

T es el tiempo de adquisición.

N es el número de muestras adquiridas.

f_s es la frecuencia de muestreo.

De aquí, N puede ser calculado despejando la ecuación anterior.

Resolución en frecuencia.

Si la secuencia de entrada a la FFT, en este caso, la señal adquirida, tiene N muestras, la representación en frecuencia tendrá la misma longitud N.

Entonces el espaciamiento en tiempo Δt es inversamente proporcional a la frecuencia de muestreo f_s :

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} \quad (2.9)$$

De esta relación se puede concluir que el espaciamiento en frecuencia Δf , que es la relación entre la frecuencia de muestreo y el número de muestras, es inversamente proporcional a N veces el espaciamiento en tiempo, así:

$$\Delta f = df = \frac{1}{T} = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{N\Delta t} \quad (2.10)$$

Ya que el análisis será entre 0 y 500 Hz se puede utilizar un espaciamiento en frecuencia de 0,625 Hz. Para que exista una representación en frecuencia cercana a la realidad, es necesario muestrear varios periodos de la señal (alrededor de 100), y ya que esta tiene una frecuencia fundamental de 60 Hz, se necesitan 6400 muestras. Con esto se necesita muestrear durante 1,6 segundos.

Tamaño de la FFT

Los algoritmos de FFT necesitan una secuencia de entrada que sea potencia de dos, así: $N=2^m$. Si esto no es así, existen dos métodos de solución para hallar el espectro que son los algoritmos de decimación mixta de Cooley-Tukey, que define la secuencia de entrada de longitud N como producto de números primos pequeños.

$$N=2^x 3^y 4^z \quad \text{donde } x, y, z=0,1,2,3\dots \quad (2.11)$$

La otra solución es la llamada *Zero Padding* que consiste en llenar de ceros la secuencia hasta el siguiente valor de 2^n . Esto no implica que se mejore la resolución en frecuencia o se afecte a las respuestas de magnitud y tiempo. La única forma de mejorar la resolución en frecuencia es aumentando el número de muestras en la adquisición.

Para el proyecto, la señal adquirida que debe tener una longitud de 6400 muestras, se puede implementar la FFT con *zero padding*.

Mejora de la Medición a Través del Promedio

El promediar mediciones sucesivas suele mejorar los resultados finales. Estos promedios pueden ser implementados entre varias mediciones o en espectros de frecuencia individuales, pero no directamente en la señal en tiempo. Los principales métodos son:

- Promedio RMS.
- Promedio Vectorial
- Pico Sostenido.

Promedio RMS.

Reduce fluctuaciones de la señal pero no el nivel mínimo de ruido ya que promedia la potencia de la señal y mantiene la fase del resultado en cero.

En caso de la FFT el promedio RMS se hace de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\langle X \rangle = \sqrt{X * \bullet X} \quad (2.12)$$

donde X es el valor complejo de la FFT de la señal de entrada x , X^* es el complejo conjugado de X y $\langle X \rangle$ el valor promedio, siendo la parte real e imaginaria promediadas separadamente.

Promedio Vectorial.

Este elimina el ruido de señales sincrónicas y computa el promedio de las cantidades complejas directamente. Esta se hace entre una adquisición y otra promediando la parte real e imaginaria separadamente. Para la FFT el de una sola adquisición, el promedio será el mismo valor.

Pico Sostenido.

Retiene los niveles pico de las cantidades promediadas para cada línea separadamente entre una FFT y otra.

Así en el espectro FFT es determinada por $MAX \sqrt{(X^* \bullet X)}$

donde X es el valor complejo de la FFT de la señal de entrada x . y X^* es el complejo conjugado de X .

Para el caso del proyecto, la mejor opción es realizar el promedio RMS, ya que se tiene solo una adquisición por medición.

Ponderación (*Weigthing*)

Cuando se realiza un promedio RMS o vectorial, se puede ponderar cada medición usando ponderación *lineal* o *exponencial*.

En la *ponderación lineal*, se combinan las n mediciones con igual peso. Cuando el número de promediación se completa, los datos son presentados.

La *ponderación exponencial* pondera con más peso los datos espectrales más recientes que los anteriores en un proceso continuo.

En el caso del proyecto, pueden aplicarse cualquiera de las ponderaciones ya que se realizará una sola adquisición por medición.

Ventanas

El algoritmo de FFT asume que las señales son periódicas en tiempo infinito desde el inicio de la señal hasta el final de la misma. En teoría, todos los cálculos para hallar la FFT asumen que las muestras son tomadas desde el inicio del periodo de la señal y termina al final del último periodo de la misma. En la implementación, la FFT asume que dicha señal se repite periódicamente una seguida de la otra.

Pero en la realidad, que una señal sea adquirida en exactamente el inicio de su ciclo es sumamente difícil, por lo que en la repetición periódica se tienen discontinuidades.

Este efecto hace que, dependiendo de la magnitud de la discontinuidad, la energía se manifieste en altas frecuencias o sea diseminada a lo largo de algunas otras. Es decir, se distorsiona la FFT real con la aparición de frecuencias no existentes en la señal real y con que no exista diferencia entre picos de frecuencia que estén cerca el uno del otro.

Para evitar este efecto se utiliza el proceso de pasar la señal por una “ventana” que minimice los efectos de la discontinuidad. Esto es, multiplicar en

el dominio del tiempo una señal por otra conocida como *ventana*, cuya amplitud varía lentamente y decae gradualmente a cero en las discontinuidades. El resultado de esto es una señal con discontinuidades muy pequeñas o sin ellas.

Existen varias clases de ventanas para diferentes tipos de aplicaciones. El siguiente cuadro, describe las aplicaciones de los diferentes tipos de ventanas:

Tabla 2.5. Características y aplicaciones de Ventanas para FFT.

| VENTANA | CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rectangular | Señales transitorias que tienen una duración más corta que la longitud de la ventana, trunca una ventana a un ancho de tiempo finito. Análisis espectral, separación de bandas en frecuencias muy juntas con amplitud similar. |
| Hanning | Señales transitorias que tienen una duración más larga que la longitud de la ventana. Aplicaciones de propósito general. Ondas sinusoidales simples o combinación de varias, señales aleatorias de banda angosta, contenido desconocido, ondas sinusoidales relativamente juntas. Análisis espectral. |
| Hamming | Señales transitorias que tienen una duración más larga que la longitud de la ventana. Es una implementación modificada de Hanning pero es discontinua en los bordes. Ondas sinusoidales relativamente juntas |
| Triangular | Ventana que tiene forma de triángulo y es para aplicaciones generales |
| Kaiser-Bessel | Separación de bandas en frecuencias muy juntas con amplitud bastante diferente. |
| Blackman | Similar a Hanning y Hamming pero con rizado reducido. |
| Techo Plano (Flat Top) | Tiene el mejor desenvolvimiento en amplitud pero limita la selectividad de frecuencia. Análisis con bastante exactitud, medidas de amplitud de tono simple. |

Para el sistema, la ventana que se ajusta mejor puede ser la tipo Hanning, pero ya que nunca se tiene suficiente información previa de la señal, lo mejor será probar las otras ventanas y elegir la que tenga el mejor desempeño.

2.4.5 ESPECIFICACIONES DEL PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES:

Filtro para ruido y componentes parásitas

- Filtro pasabajas IIR.
- Topología Butterworth
- Segundo o cuarto orden.
- Frecuencia de en 500 Hz.

Técnica de procesamiento de señales

- Análisis en frecuencia por transformada de Fourier.
- Implementación mediante FFT.
- FFT de mínimo 6400 muestras.
- La secuencia de entrada debe usar *zero padding*.
- Optimización de FFT mediante promedio RMS.
- Se hará ponderación de mediciones lineal o exponencial.
- Implementación con ventana tipo Hanning

2.5 DETECCIÓN DE FALLA

El criterio para detectar una falla por cortocircuitado en el estator viene de la existencia o no de los picos de corriente calculadas según la ecuación 1.8 que puede ser re-escrita de la siguiente manera:

$$f_{cc} = f_1 \left(\frac{n}{p} (1-s) \pm k \right) \quad (2.13)$$

Donde:

- f_1 es la frecuencia de alimentación del motor
- p el número de pares de polos
- s el deslizamiento
- n puede tomar valores de 1,2,3...
- k de 1,3,5...

Es necesario, además, tomar en cuenta que la presencia de estos picos en la señal de voltaje. Es decir, si estos picos existen también en la señal de voltaje, el problema es por la alimentación y no necesariamente por un cortocircuito en el estator, y la combinación de la existencia o no de los picos de corriente y voltaje deben interpretarse según el diagrama de flujo de la Figura 1.9.

2.6 ALMACENAMIENTO DE DATOS

El análisis de datos se utiliza para obtener respuestas y patrones útiles para determinar una condición de algún proceso. El almacenamiento de éstos, sirve como un respaldo para cuando se requiera análisis posteriores de confirmación o para realizar análisis estadísticos particulares.

El almacenamiento de datos es necesario en cualquier proceso industrial [33], y estos pueden variar mucho entre sus naturalezas, es decir, se debe almacenar diferentes tipos de datos como temperatura, presión o velocidad, generando una mezcla de tipos de datos y registros.

Para que los datos sean elegibles de ser almacenados deben haber sido pre-procesados, limpios de ruido, con errores corregidos en lo posible, y deben ser útiles aplicando una reducción del volumen de datos.

En el caso de este sistema, la elección de las variables a almacenar es una tarea relativamente sencilla. Los datos deben ser útiles para la generación de reportes y el análisis de datos con herramientas externas que sean accesibles en la mayoría de los computadores dedicados a este fin.

2.6.1 VARIABLES A ALMACENAR

Por la importancia de cada variable, los datos a almacenar deben ser los siguientes:

- Variación de Tiempo.
- Señal de corriente en el dominio del tiempo.
- Señal de voltaje en el dominio del tiempo.
- Variación de Frecuencia.

- Señal de corriente en el dominio de la frecuencia.
- Señal de voltaje en el dominio de la frecuencia.

Los datos enviados no deben ser más que los suficientes, dependiendo del ancho de banda del análisis en frecuencia y del hecho de que son necesarios solo unos cuantos períodos para tener una idea clara de las señales en tiempo.

Debido a la tendencia de la industria a estandarizar el almacenamiento de datos [33], es necesario que el sistema soporte dos tipos de almacenamiento:

- En hoja de cálculo.
- En base de datos estandarizada.

El objetivo de estas dos opciones, es la de darle versatilidad a los datos adquiridos de manera que se puedan reutilizar en procesos que involucren análisis de datos por otros usuarios.

2.7 REPORTE

El reporte es un documento en donde se resume el proceso que se ha llevado a cabo. Este debe ser claro, conciso y debe tener la siguiente información:

- Formas de onda de tiempo para corriente y voltaje.
- Formas de onda de la corriente en frecuencia en el rango necesario.
- Formas de onda de voltaje en frecuencia en el rango necesario.
- Datos del motor analizado.
- Diagnóstico y recomendación.
- Lugar donde se enviaron los datos.
- Fecha y hora de la ejecución del proceso.
- Debe generarse en una aplicación estándar, es decir, un archivo *.doc, *.html ó *.pdf.