

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

Diseño e Implementación de un Sistema de Emulación de Fallas para una Planta Intercambiadora de calor

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Electrónico**, que presenta el bachiller:

Miguel Masías Fernández

ASESOR: Dr. Juan Javier Sotomayor Moriano

Lima, Junio de 2014

RESUMEN

Hoy en día, las industrias son cada vez más activas, más aún en nuestro país se está produciendo grandes avances en distintos rubros industriales gracias a las inversiones que se han realizado. Se genera entonces la necesidad de tener un control correcto y efectivo en estos procesos para hacerlos óptimos, es así que aparecen los sistemas de diagnósticos de fallas para mejorar las capacidades de los sistemas de control. Para lograr que los sistemas de diagnósticos de fallas sean adecuados para cada proceso y cumplan su propósito se desarrollan sistemas de emulación de falla, que permiten evaluar y de ser necesario corregir, los sistemas de diagnóstico de falla.

En el presente trabajo de tesis se presenta el diseño e implementación de un sistema de emulación de fallas para una planta intercambiadora de calor, específicamente en las bombas centrífugas y válvulas que se encuentran en esta. La emulación de fallas para bombas centrífugas se basó en el método de detección por análisis de vibraciones y en el caso de las válvulas en la falla de fricción estática.

Los trabajos realizados incluyen, el estudio de los requisitos de condición de falla que aparecen en los instrumentos de una planta intercambiadora de calor (bombas centrífugas y válvulas), el diseño de circuitos para generación de señales de falla y de dos canales de generación de fallas (uno para bomba centrífugas y otro para válvulas).

El sistema de emulación de fallas desarrollado funciona de manera correcta, emula de manera correcta las fallas de desequilibrio, desalineación y falla eléctrica en el caso de las bombas centrífugas y genera la señal adecuada para válvulas.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO 1: SISTEMAS DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS.....	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Definición de un sistema de diagnóstico de fallas.....	6
1.3 Emulación de fallas.....	8
1.4 Descripción de la planta de estudio.....	9
CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS Y REQUERIMIENTOS.....	12
2.1 Introducción.....	12
2.2 Generadores de ondas arbitrarias (AWG).....	14
2.3 Objetivos.....	18
CAPÍTULO 3: DISEÑO DE UN SISTEMA DE EMULACIÓN DE FALLAS.....	19
3.1 Introducción.....	19
3.2 Diagrama de bloques.....	20
3.3 Diseño del sistema de emulación de fallas.....	21
3.3.1 Bloque Interfaz de usuario.....	21
3.3.2 Bloque generación señales de falla.....	23
3.3.3 Bloque de adquisición de datos (DAQ).....	28
3.3.4 Bloque acondicionamiento de señal.....	28
3.3.5 Fuente de alimentación para el sistema.....	32
3.3.6 Diseño final.....	34
CAPÍTULO 4: SIMULACIONES, IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS.....	35
4.1 Introducción.....	35
4.2 Simulaciones.....	36
4.3 Implementación.....	40
4.4 Pruebas.....	41
4.5 Discusión de resultados.....	46
CONCLUSIONES.....	48

RECOMENDACIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	50



INTRODUCCIÓN

Ante el creciente desarrollo de las industrias en nuestro país es necesario estar a la vanguardia en términos de control y automatización para garantizar que los productos manufacturados en el Perú sean de óptima calidad y estén en condiciones de satisfacer a los clientes más exigentes. Sin embargo, toda planta de producción está compuesta de diversos elementos que la hacen susceptible a diversas fallas, las cuales pueden ser degenerativas y estos errores se ven reflejados tanto en pérdidas, en cuanto a recursos humanos como monetarias, y en la calidad de los productos que se obtienen de dicha planta, lo cual a la larga también es una grave pérdida en cuanto al valor que tiene el producto.

Gracias al desarrollo en la teoría de control y los diversos métodos que se han desarrollado se ha logrado optimizar buena cantidad de procesos, sin embargo las fallas siguen estando presentes y su efecto nocivo debe ser estudiado. Es entonces que aparecen distintos métodos de diagnóstico de fallos, los cuales al ser implementados en una planta permiten dar una alarma inmediata al detectarse una falla que modifique la respuesta esperada de la planta y la dirija hacia una anómala. Estos métodos pueden ser debido a redundancia analítica o redundancia física.

Para el estudio de las capacidades de dichos sistemas de diagnósticos de fallas en el presente trabajo de tesis se desarrollara un sistema de emulación de fallas, es decir un sistema que recrea fallas y perturbaciones del sistema de estudio, de manera que se pueda saber realmente que tan eficiente es el sistema de diagnóstico de fallas que se ha implementado. Estos sistemas de emulación de fallas pueden llegar a ser de gran utilidad puesto que permiten saber cómo trabaja el sistema en presencia de una o más fallas, como se comporta el sistema de diagnóstico de fallas (es decir, deja saber si es eficiente) y todo esto sin necesidad de tener realmente elementos que están fallando.

El sistema de emulación de fallas que se desarrollará a lo largo de este trabajo de tesis se basa en señales eléctricas que representan señales de falla, en el caso específico de este trabajo de tesis se centrará en las fallas que se presentan en válvulas y en bombas centrifugas de la planta intercambiadora de calor del laboratorio de control y automatización del pabellón V, de la sección de ingeniería electrónica, que se estudia.

En el capítulo 1 del presente documento se realizará una descripción formal de sistemas de detección de fallas así como de los sistemas de emulación de fallas. Del mismo modo

se hará una descripción de la planta de estudio, detallando que elementos de la planta serán estudiados.

Los métodos que existen para la emulación de fallas serán descritos en el capítulo 2, en el cual también se realiza un análisis de los requerimientos de condición de falla para que se puedan emular correctamente. Se incluyen en este capítulo los objetivos de la tesis.

En el capítulo 3 se desarrolla el diseño del hardware y software necesario para la emulación de fallas, se seleccionan los componentes adecuados y se presentan los esquemáticos de circuitos desarrollados y los diagramas de flujo de software, en los casos requeridos.

En el capítulo 4 se detallan las simulaciones y pruebas realizadas para corroborar el correcto funcionamiento del diseño realizado, del mismo modo se incluye el costo del desarrollo.

Finalmente, se presentan las conclusiones a las que se han llegado en el presente trabajo, así como las recomendaciones pertinentes.

CAPITULO 1

SISTEMAS DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS

1.1. Introducción

Hoy en día las industrias son cada vez más activas, más aún en nuestro país se está produciendo grandes avances en distintos rubros industriales gracias a las inversiones que se han realizado en el país.

La necesidad de poner en marcha este proceso en que las industrias crecen se ve en el hecho de que para poder lograrlo se deben emplear muchas más máquinas y plantas, que además deben ser adecuadas para fines o propósitos específicos. Para poder manejar dicha maquinaria no basta con tener una ligera supervisión sobre la misma, sino un control muy específico y adecuado a cada sistema individual, esto para evitar poner en riesgo a personas y activos materiales, paradas de planta que representan también pérdidas en la producción, pérdidas materiales, entre otros.

En términos generales todo sistema está expuesto a fallas, ya sea que provienen de perturbaciones externas o generadas por el mismo sistema, es el caso de un motor que al trabajar produce vibraciones o el caso de un sistema expuesto al medio ambiente.

Una falla es un defecto o incumplimiento de una obligación, según su definición [1]. En el caso específico de una planta, una falla es cualquier cosa que modifica el comportamiento normal de un sistema tecnológico, de manera que dicho sistema tecnológico no satisfaga su propósito específico. [2]

Para poder remediar estas fallas se implementan sistemas de control para automatizar las plantas, corregir las fallas manipulando las entradas con actuadores y midiendo las respuestas de salida con sensores.

El sistema deberá poder identificar la falla, su magnitud, en donde ocurrió y en que instante ocurrió, además de ser capaz de tomar las medidas correctivas adecuadas para superar dicha falla o problema. [2] [3] [8]

Es evidente que un sistema “robusto”, es decir muy resistente a fallos, es de gran utilidad. En sistemas grandes, cada componente está designado para cumplir una función o tarea específica. Con cada componente trabajando de manera adecuada se obtiene el resultado deseado, basta con un solo componente trabajando de manera incorrecta para que todo el sistema se deteriore.

Cuando en un sistema exista una falla, es decir algún componente del sistema integrado no funcione de manera correcta, se debe detectar la ocurrencia de dicha falla y además identificar qué tipo de falla es. Esto es lo que se conoce como diagnóstico de fallas, además del diagnóstico una opción óptima para el sistema que se tiene sería que exista un rediseño del controlador, que este controlador se adapte a la situación de fallo y el sistema pueda seguir su producción hacia la meta esperada.

1.2. Definición de un sistema de diagnóstico de fallas

Como punto de partida para comprender que es un sistema de diagnóstico de fallas debemos primero definir que es una falla. Una falla en un sistema dinámico es la desviación de la estructura del sistema o de los parámetros del sistema hacia una situación anómala, alejada de las condiciones nominales. [2]

El diagnóstico de fallas es un paso crucial en la implementación de sistemas eficientes. Esta es utilizada para determinar que un problema ha ocurrido en cierto nivel o punto del área de operación, en otras palabras debe reconocer si el sistema está funcionando de manera adecuada pero debe hacerlo de acuerdo a valores preestablecidos, márgenes que determinan si existe o no error.

El sistema de diagnóstico de fallos debe poder identificar que falla se ha producido, así como su magnitud, lugar y el instante en que se produjo.

Los sistemas de control tolerantes a fallas deben mostrar o encontrar la localización y magnitud de la falla. Los puntos en que se debe poder contar son:

- **Detección de Falla:** Decidir si ha ocurrido o no una falla. Este paso determina el momento en que el sistema ha estado expuesto a una falla. [5] [8]
- **Aislamiento de la Falla:** Encontrar en que componente se obtuvo la falla, es decir que este paso determina la ubicación de la falla. [5] [8]
- **Identificación y estimación de la Falla:** Identificar la falla y poder estimar su magnitud, de esta manera se determina la clase de falla y la severidad de esta misma. [5] [8]

En la figura 1.1 se muestra la arquitectura de un control tolerante a fallos. Este tipo de control extiende el lazo de realimentación tradicional de un controlador a un nivel de supervisión, donde se incluyen los bloques que serán de diagnóstico y con la respuesta de este el rediseño del control.

De no ocurrir fallas el bloque de diagnóstico identifica que el sistema no está siendo expuesto a una falla y por tanto no cambia el control necesario; en cambio, si ocurre una determinada falla el bloque de diagnóstico identificará la falla y tendrá que rediseñar el control para ajustarse a las nuevas condiciones y corregir la operación. [2]

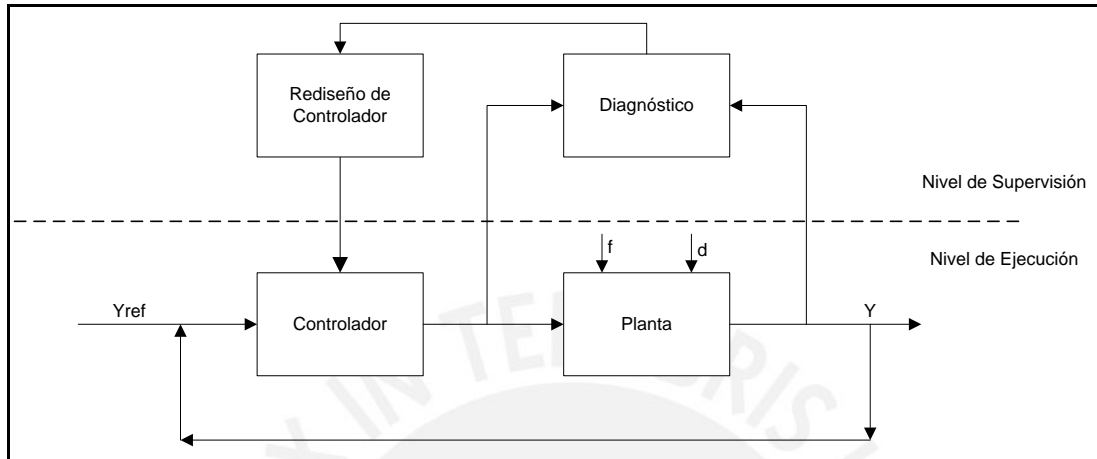


Figura 1.1: Arquitectura Tolerante a Fallas [5]

Existe la posibilidad de tener fallas aditivas, es decir que adicionan variables a nuestro sistema, o fallas multiplicativas que producen una variación en la magnitud de las variables. Existen además otras clasificaciones para las fallas, por ejemplo están las fallas de:

- **Sensores:** cuando se interrumpe el intercambio de información entre la planta y el controlador. La planta no es observable, para solucionar este problema se deben seleccionar y usar nuevas mediciones. [2] [5]
- **Actuadores:** se pierde la posibilidad de influenciar a la planta para realizar algo determinado, esto hace que la planta sea parcialmente incontrolable. La solución es emplear nuevos actuadores. [2] [5]
- **Planta:** varían las condiciones de dinámica y trabajo del proceso, si estos cambios no pueden ser tolerados por alguna ley de control es necesario efectuar una reconfiguración del controlador. [2] [5]

Luego de este breve análisis se entiende que todo sistema es propenso a fallas, debido a que contiene tanto actuadores como sensores, además de la planta como conjunto. También, que es necesario que esta sea controlada de manera adecuada según cuál sea la falla que se presenta mediante un rediseño de nuestro control posterior al diagnóstico adecuado de la falla.

Las fallas pueden generar pérdidas, traducidas en daño a los equipos que conforman el sistema o como daño a quienes operan dicho sistema. Para lograr que un proceso sea

óptimo se debe evitar que ocurran fallas, o tratar de compensar fallas para que el sistema pueda continuar funcionando en presencia de estas. De cualquier modo, el sistema de detección de fallas debe identificar, localizar y cuantificar las fallas para que se tomen medidas correctivas, manuales o en el mejor caso automáticas. [2] [5]

Para poder tener un mejor sistema, más robusto, es necesario lograr una buena representación modelo del sistema real a estudiar. Además, se debe conocer que fallas pueden afectar a dicho sistema y de ser posible emularlas para poder conocer su efecto específico en el sistema. Esto es importante también para poder detectar, aislar y en la medida de lo posible corregir o compensar el conjunto de fallas que puedan estar ocurriendo.

En líneas generales los principales requerimientos de un sistema de detección de fallas son:

- **Seguridad:** Ausencia de algún peligro. Un sistema de seguridad es parte importante del sistema de control y diagnóstico de fallos, puesto que protege todos los equipos que forman parte del sistema a controlar. Permite además el apagado o pausa automática del sistema, de manera que si ocurre un fallo los elementos del sistema permanezcan sin daños.[2]
- **Confiabilidad:** Se refiere a la probabilidad de que el sistema realiza una función específica (requerida) por un determinado periodo de tiempo bajo circunstancias normales. La confiabilidad evalúa la frecuencia en q el sistema falla, sin embargo no da información sobre el estado actual de fallas. En un sistema tradicional, nuestro sistema de control de fallos no permite cambiar o mejorar la confiabilidad de los componentes de la planta, pero si permite mejorar la confiabilidad del sistema como conjunto.[2]
- **Disponibilidad:** Es la probabilidad de un sistema a estar operativo cuando sea requerido. En contraste con la confiabilidad este punto depende de las políticas de mantenimiento, que son aplicadas a los componentes del sistema.[2]
- **Dependencia:** Finalmente esta integra a las 3 propiedades antes mencionadas. El sistema que deseamos es a prueba de fallas, con alta seguridad y confiabilidad.[2]

1.3. Emulación de fallas

En informática un emulador es un software que permite ejecutar programas de computadora en una plataforma (arquitectura hardware o sistema operativo) diferente a la original. En términos de electrónica, un emulador sería una herramienta que permita modelar de forma precisa un dispositivo (su comportamiento eléctrico). En el caso específico de un emulador de fallas se trata de modelar de manera adecuada las

señales que leen determinados sensores cuando un equipo está fallando, es decir la señal que se lee en un escenario defectuoso o de falla.[6] [7]

Un emulador es un dispositivo de hardware o software, o ambos, que duplica (o emula) las funciones de un sistema (huésped o 'guest' en inglés) en otro sistema (anfitrión o 'host' en inglés), diferentes, para que el comportamiento emulado se asemeje al del sistema real (huésped).

La emulación de fallas a un sistema es una técnica que como su nombre indica consiste en 'introducir' o recrear comportamientos de fallas en el sistema observado(a las lecturas de los sensores del sistema o a la herramienta de hardware y software que analiza estos datos), esto para poder conocer y cuantificar la robustez de un sistema de detección de fallas, así como para validar las medidas de dependencia que existen este sistema de estudio (también referido como sistema objetivo). Del mismo modo haciendo uso de esta técnica se puede determinar el comportamiento del sistema en presencia de fallas, determinar la cobertura de los detectores de error y los mecanismos de compensación de error.

Los ingenieros usan la emulación de fallas para probar sistemas o componentes tolerantes a fallas debido a que permiten en muchos casos realizar pruebas de sistemas analíticos sin la necesidad de tener una falla real, la cual podría dañar equipos. Con la emulación de fallas se pueden probar las capacidades de detección, de aislamiento de fallas, y de reconfiguración y recuperación. Para ser aplicado a un sistema de detección de fallas, el emulador se utiliza para representar el estado de uno o más componentes de la planta de estudio, de manera que se pueda observar el comportamiento del sistema cuando ocurre un cambio o una anomalía en uno de sus elementos. El costo de los estudios de este comportamiento será reducido respecto al que representaría hacer múltiples pruebas físicas para generar el comportamiento defectuoso que se desea analizar desde el sistema de detección de fallas.

1.4. Descripción de la planta de estudio

La planta de estudio, ubicada en el laboratorio de control en el pabellón V de ingeniería electrónica de la PUCP que se muestra en la figura 1.2 tiene como objetivo el control de temperatura de agua que se encuentra almacenada en un tanque mediante el uso de un sistema intercambiador de calor. La planta cuenta con diversos elementos que le permiten cumplir dicho objetivo. El control se efectúa en el flujo de agua caliente que pasa a través de un sistema de tuberías, impulsada por una bomba centrífuga que

permite el movimiento del agua y una válvula proporcional neumática que restringe el paso de agua. La bomba impulsa un flujo de agua caliente que viene desde el tanque de agua caliente, cuya temperatura es controlada por un sistema de resistencias eléctricas que elevan la temperatura según sea necesario, luego la válvula neumática controla el ingreso de agua caliente al intercambiador de calor. Del mismo modo al intercambiador de calor ingresa agua a menor temperatura impulsada por una segunda bomba centrífuga, el intercambio de calor entre el agua del tanque de agua caliente y el tanque de suministro es lo que se desea controlar.



Figura 1.2: Planta intercambiadora de calor, laboratorio de control.

En la figura 1.3 se muestra el diagrama P&ID de la planta Intercambiadora de calor.

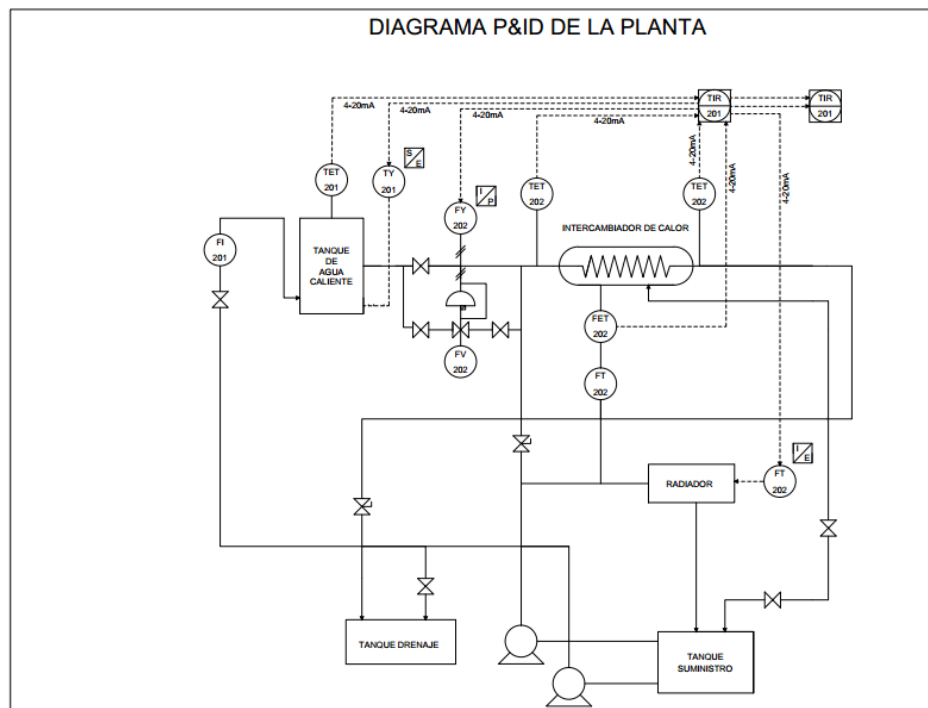


Figura 1.3: Diagrama P&ID de la planta intercambiadora de calor

Existen muchos elementos en una planta, en el caso específico de la planta intercambiadora de calor que se estudia en este trabajo se encuentran bombas centrífugas y válvulas como los elementos donde se analizará la ocurrencia de fallas. Para el estudio de estas fallas existen muchos métodos de análisis para estas fallas, en el caso de los motores por ejemplo se puede hacer por el método de análisis de vibraciones, análisis de temperatura, estimación de parámetros electromagnéticos del motor, análisis de partículas de aceite, análisis de señal de corriente del motor, entre otros. Por el lado del análisis de fallas para válvulas encontramos el método de correlación cruzada, estimación multi-modelo y detección de cambio, patrones en la variable de proceso con derivadas finitas, entre otros.

En general existen una gran gama de metodologías y herramientas para poder detectar las fallas que puedan presentarse en una planta (en el conjunto de sus componentes).

En el caso específico de bombas (motores) el análisis de vibraciones está muy desarrollado y es uno de los principales usados en la industria, existe maquinaria que permite determinar directamente el espectro de frecuencia y determinar directamente de que falla se trata, puesto que en este análisis cada tipo de falla del motor presenta una frecuencia característica, este será el modelo del que se parta para emular fallas en bombas centrífugas.[3] [4]

Por el lado de las válvulas trataremos de recrear el fenómeno de “stiction”, es decir fricción en las piezas internas y consecuente mal funcionamiento en la apertura o cierre de la válvula. [3] [14]

CAPITULO 2

DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS Y REQUERIMIENTOS

2.1. Introducción

Como se ha mencionado antes la emulación de fallas es un método bastante útil para poder estudiar diversos sistemas en condiciones fuera de las nominales, es decir en presencia de fallas.

Existen muchas maneras de inducir el comportamiento anómalo en dichos sistemas, es el caso en que se pueden generar algoritmos en software tales como Matlab™ donde se recrearán situaciones en que el sistema, modelado ahora en software, padece de distintas fallas en distintas locaciones.

De manera similar se pueden crear escenarios físicos donde el comportamiento del sistema será de falla, como ejemplo se puede imaginar un motor eléctrico cuyos bobinados se cortocircuitan adrede de manera que su comportamiento sea el de un motor dañado precisamente de esta manera (lo cual suele pasar en la práctica).

Además de estos métodos se encuentran muy comúnmente los métodos de emulación de fallas por hardware y por software.

El escoger entre métodos de emulación de fallas por hardware o por software depende mucho del tipo de fallas en las que se tiene interés y también en el esfuerzo que requieren para crearlas, por ejemplo si se requiere una falla que fuerza un valor permanente en cierto punto de un circuito sería recomendable usar hardware, puesto que se podrá tener control en la locación de dicha falla. En cambio, si se requieren fallas como corrupción de datos (variaciones en valores que el sistema adquiere y posteriormente emplea para analizar) entonces la aproximación a este problema por software es mucho más sencilla y sería más satisfactoria. Para algunos otros tipos de fallas es indistinto el método que se aplique, para estas en que cualquier método es aplicable entran en consideración otros factores como costo, precisión o intrusividad para decidir qué camino tomar.

Emulación de fallas por hardware:

La emulación de fallas por hardware usa elementos de hardware adicional al del sistema objetivo. Dependiendo de la locación de la falla en sí y su hardware existen varias categorías, algunas de ellas se explican brevemente a continuación:

- **Con contacto:** en esta técnica se aplica energía en un determinado punto del sistema, por lo general esta técnica se emplea para fallas de “atasco” (aquellas que fijan un valor permanente en determinado punto del circuito de un sensor o un actuador). Se debe tener cuidado con este tipo de pruebas puesto que si se adiciona demasiada corriente o voltaje se podría dañar el hardware del sistema objetivo. [6] [7]
- **Sin contacto:** en esta técnica se suele apelar a la presencia de los elementos electrónicos que pueden ayudar en el estudio de una planta. Básicamente se ataca a los sensores y transductores de señales, esto mediante el uso de campos magnéticos e inducción de corrientes anómalas en dichos componentes, de manera que sus lecturas sean erradas, todo sin necesidad de manipular directamente los elementos de estudio. Esta técnica sin embargo no se suele emplear, puesto que resulta muy difícil dirigir y controlar de manera precisa estos comportamientos. [6] [7]
- **Introducción de señales o Generadores de ondas arbitrarias (AWG):** en este caso se introducen ciertas señales con parámetros adecuados para ver la respuesta que ofrece un sistema de estudio. [6] [7]

Emulación de fallas por software:

Este tipo de emulación de fallas suele ser bastante atractivo puesto que no se requiere de hardware costoso, además pueden ser aplicadas directamente a los códigos específicos del sistema objetivo así como a los algoritmos de control que les gobiernan, lo cual se hace muy complicado con emulación de fallas por hardware. Aunque la emulación de fallas por software es bastante flexible tiene algunas limitaciones, como el hecho de no poder llegar a ciertas locaciones, son inaccesibles vía software, y que la instrumentación de este software podría perturbar la estructura original del software con el que trabaja el sistema objetivo, por lo que el diseño debe ser muy minucioso.

Podemos categorizar la inyección de fallas por software de la siguiente manera: durante tiempo de compilación o durante ejecución.

- **Durante el tiempo de compilación:** las instrucciones de programa son modificadas antes de que el programa del sistema objetivo cargue y ejecute sus instrucciones; en lugar de insertar fallas en el hardware del sistema objetivo se introducen las fallas en el código fuente del programa del sistema objetivo para emular el efecto de hardware y software. Este código modificado altera las instrucciones del programa del sistema objetivo, causando una imagen errónea en el software que al ser ejecutado está ejecutando también las fallas y actúa como si las fallas estuviesen activas. La implementación de este método es muy sencilla, sin embargo está limitada

en la medida que no permite emulación de fallas mientras el programa que gobierna al sistema objetivo está ejecutándose. [6] [7]

- **Durante la ejecución:** se requiere de un mecanismo que desencadene la emulación de fallas, comúnmente se aplica un “time-out”, cuando un temporizador expira en un determinado tiempo se desencadenan las fallas (un evento de fin de temporizador invoca una interrupción de “fallas”), este temporizador puede bien ser de hardware o de software. También se puede aplicar emulación de fallas por inserción de código, en esta técnica se adicionan instrucciones al programa del sistema objetivo, de esta manera se permite que ocurra una emulación de fallas antes o después de instrucciones particulares. [6] [7]
- **Simulación del sistema:** se efectúa un modelamiento del sistema objetivo y se introducen modificaciones para obtener eventos de comportamiento anormal. Un ejemplo es el modelamiento de un sistema en el software Matlab™ y la posterior simulación añadiendo las modificaciones necesarias (respuesta a distintos estímulos, lecturas variables, etc) y estudiando la respuesta del sistema ante estas modificaciones. [6] [7]

2.2. Generadores de ondas arbitrarias (AWG)

En el presente trabajo de tesis se emplea el método de introducción de señales o generadores de ondas arbitrarias (AWG por sus siglas en inglés “Arbitrary Waveform Generator”).

Para que las señales introducidas sean óptimas y reflejen a cabalidad las señales que se generan cuando existen fallas en el sistema objetivo se debe conocer primero estas señales y sus características.

Requerimientos básicos de señales de falla:

La manera tradicional de observar una señal es el dominio del tiempo, donde se analizan variaciones de algunos parámetros en función del tiempo. Sin embargo, si se pretende observar o detectar variaciones en la señal de muy pequeña amplitud, es decir, pequeños cambios que puedan aparecer superpuestos a la señal de comportamiento normal, es muy posible que no se aprecien fácilmente en el dominio del tiempo. Por el contrario un análisis de la señal en el dominio de la frecuencia sí permite separar las componentes de distintas amplitudes, y frecuencias características. [13]

Para el estudio de las fallas en las bombas centrífugas se emplea el análisis vibracional o análisis de vibraciones, esta herramienta analiza la frecuencia y la magnitud que se

obtiene para determinadas oscilaciones o vibraciones. Las vibraciones son el movimiento de vaivén de una maquina o elemento en ella en cualquier dirección desde su posición de equilibrio.

El movimiento vibratorio que se ha descrito genera desplazamientos, velocidades y aceleraciones por lo general senoidales, en la figura 2.1 se muestran una falla de desequilibrio en el dominio de la frecuencia y en dominio del tiempo [17]. Sin embargo en algunos casos pueden presentarse algunas otras formas de onda es el caso por ejemplo de señales en forma de diente de sierra o en forma de un tren de pulsos, según la falla y locación. Para realizar su medición existen muchos criterios válidos, como el de medir un valor pico o un valor eficaz, sin embargo si la vibración llega a ser más compleja no es conveniente utilizar estos criterios puesto que sólo se tiene información para un instante de tiempo. [13]

Estas vibraciones son causadas por problemas mecánicos y problemas eléctricos (desequilibrio de elementos rotativos, rodamientos deteriorados, cortocircuito en devanados de motores, etc.).

Las características de este análisis por lo general son frecuencia como característica principal y otros como impulsos son características complementarias. [10]

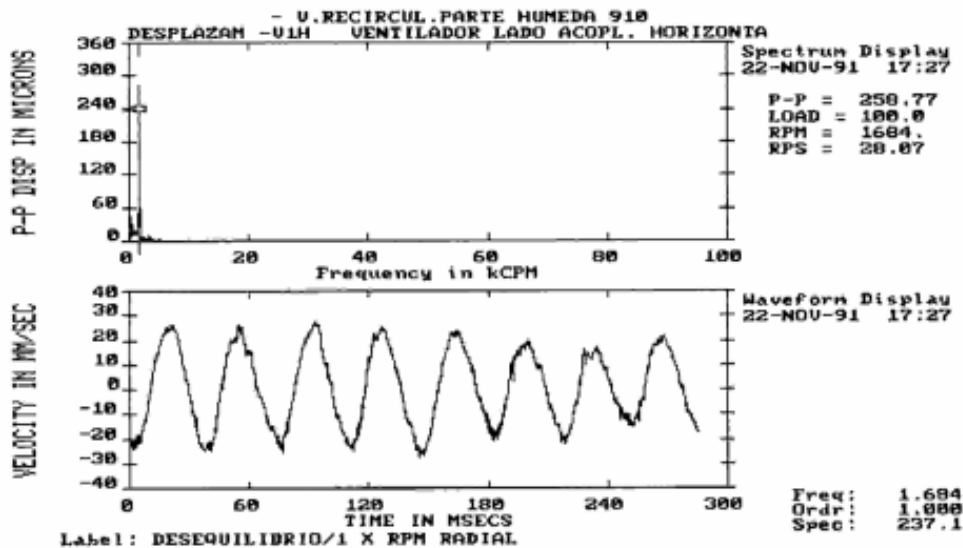


Figura 2.1: Falla de desequilibrio: dominio de la frecuencia y dominio del tiempo. [17]

La frecuencia es entonces una característica relativamente simple, pero importante para el análisis. Es el número de ciclos que se concretan en un periodo, y permiten identificar

el problema o falla (cada vibración y sus múltiplos corresponden a un tipo de problema específico).

La amplitud de la vibración nos podrá indicar la gravedad del problema, se puede medir esta amplitud para desplazamiento, velocidad o aceleración (según el instrumento de medición). La velocidad de la vibración toma en cuenta el desplazamiento y la frecuencia, de esta manera es un indicador directo de la severidad de una falla. La amplitud viene a ser un indicador proporcional de la cantidad de cierto desbalance que existe en alguna pieza de la máquina que se estudia, proporcional a una falta de alineamiento, entre otras. A pesar de que la amplitud de la vibración nos permite conocer la gravedad del problema es muy difícil establecer límites para que la vibración sea detectada como falla, por lo general el análisis de vibraciones se basa en encontrar avisos con tiempo suficiente para el análisis de causa y medidas correctivas para problemas, en la medida que el paro de la maquina sea mínimo. Una vez que se obtiene esta memoria histórica de datos para cada elemento de la máquina de estudio el valor medio refleja la normalidad en su funcionamiento. Excesivas desviaciones respecto a este valor indicarán las posibles fallas, y se tomará en cuenta la frecuencia a la que ocurren las mayores vibraciones. En caso no se cuente con datos previos de una maquina se puede analizar la severidad de las vibraciones de acuerdo a determinadas tablas especializadas.

Los impulsos (energía de impulsos) normalmente no brindan información altamente relevante en el análisis vibracional en predicción, este parámetro mide impulsos de energía de vibración de breve duración, es decir de alta frecuencia. Estos impulsos pueden tener distintos orígenes, debido a defectos en rodamientos o engranajes, rozamiento, impacto ente piezas, etc. Sin este parámetro no se podrían detectar fallas en engranajes o rodamientos defectuosos, analizando las altas frecuencias de vibración podemos analizar rápidamente si es que existen o no fallas o defectos en esta clase de elementos.

El análisis vibracional cuenta de 2 etapas: la adquisición y la posterior interpretación de datos. El primer paso, de adquisición, es el paso principal para el análisis. Los datos que se toman como desplazamiento, velocidad o aceleración dependen de la velocidad de la máquina y su relación con frecuencia. [10]

Cuando se conocen los datos de vibraciones de una máquina donde se ha detectado un problema es necesario determinar cuál ha sido su causa, de manera que se pueda remediar esta falla de la manera más apropiada. El defecto se puede localizar al comparar amplitudes de vibraciones tomadas. Los valores de una máquina que funciona correctamente suelen seguir una línea de tendencia ligeramente creciente o constante, si detectamos una tendencia que asciende de manera inesperada podríamos esperar

que exista algún tipo de falla. Generalmente la amplitud máxima de vibración se da en los puntos donde se localiza el problema, sin embargo puede darse el caso en que la vibración ha sido transmitida a otros puntos de la maquina aun cuando en estos otros no se encuentra el problema. El análisis de graficas de amplitud respecto a frecuencia pueden indicar el tipo de defecto que existe, pero son pocas las veces en que aparecen problemas aislados, por tanto espectros donde se refleje claramente el espectro.

El estudio de datos de vibraciones y sus espectros es la base para encontrar las causas y medidas adecuadas para corregir el defecto que estas indican. Es importante prestar atención a las vibraciones que vienen acompañadas de otros efectos como son por ejemplo el ruido, o valores excesivos de amplitud en comparación a los valores que se presentan durante el correcto funcionamiento de la máquina, en dichos casos debe analizarse el espectro de frecuencia para identificar las causas de la falla.

Se muestran en la tabla 2.1 algunas fallas y sus respectivas frecuencias características (en términos de RPM nominales de la máquina rotativa en algunos casos).

Tabla 2.1: Fallas y Frecuencias Características [17]

Falla	Frecuencia Característica
Desequilibrio	1 x RPM
Desalineación	2 x RPM
Problemas Eléctricos	50,100,150 Hz
Desgaste Mecánico	1-10 Hz

En cuanto a válvulas proporcionales se refiere se debe lidiar con fallas de fricción estática. Para el análisis de dichas fallas se cuenta con una amplia gama de métodos, entre ellos por ejemplo se encuentra el método de estimación de zona muerta producida por “Backlash” en lazos de control, donde se estudia la zona muerta (dead band), zona en donde no hay respuesta en la válvula a cambios enviados por el controlador.

Este método estudia principalmente un periodo de tiempo entre los 2 cruces por cero de una determinada señal y la distancia respecto a un setpoint determinado de dicha señal, permitiendo estimar matemáticamente un valor de zona muerta que nos da suficiente información para poder compensar dicha falla. En la figura 2.2 siguiente se observa dicho fenómeno, el cruce de la señal de control en rojo por el setpoint establecido en color celeste.[15] [16]

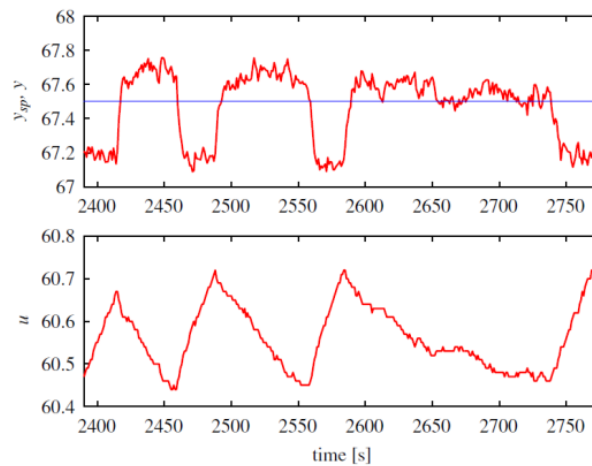


Figura 2.2: Cruce de parámetro de control por setpoint establecido. [3]

Para poder recrear el fenómeno que se produce en la fricción estática se utilizará un offset que hará las veces de desviación entre comando enviado por el controlador y lectura de la planta. Este valor debe ser apropiado y considerado dentro de un rango que permita a un sistema de detección identificar que existe dicha falla, pero sin tener que forzar una parada de planta, es decir el valor no debe ser muy elevado.

El valor que comúnmente se detecta como promedio de fricción estática y se asume como admisible es de 5% y los valores por debajo de este porcentaje considerándose banda muerta si es que la válvula no responde a los comandos que envía el controlador, y los que son superiores a este porcentaje se consideran dañinos puesto que introducen una marcada oscilación al sistema. [14]

Este valor deberá ser manipulado por el usuario del sistema de emulación de fallas.

2.3. Objetivos

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo principal diseñar e implementar un sistema de emulación de fallas mediante hardware, que permite generar algunas de las señales de falla que aparecen en bombas centrífugas y válvulas, elementos que conforman una planta intercambiadora de calor.

Los objetivos específicos incluyen:

- Estudio de los requisitos de condición de falla en los instrumentos de una planta intercambiadora de calor (bombas centrífugas y válvulas).
- Diseñar un dispositivo de hardware que permita emular las señales de falla concernientes a bombas centrífugas y válvulas.
- Emular la aparición simultánea de fallas en bombas centrífugas y válvulas.

CAPITULO 3

DISEÑO DE UN SISTEMA DE EMULACIÓN DE FALLAS

3.1. Introducción

Para el diseño del sistema de emulación de fallas hemos realizado en primer lugar un estudio de los métodos para la emulación de fallas así como de las características básicas que debe ofrecer el sistema de emulación de fallas. Una vez identificados estos mínimos requerimientos y parámetros podemos proceder a la selección de componentes que se adecuen a nuestros fines.

Es importante también la alimentación del sistema, referencias visuales para el usuario del sistema de emulación de fallas y una manera correcta de manipular los parámetros de interés.

La alimentación del sistema se diseñará en base a consumo total del sistema, por ello analizaremos el consumo de las distintas etapas que componen el sistema, en base a las hojas de datos técnicos que ofrecen los fabricantes de los componentes que sean escogidos.

Para la generación de las señales de bombas centrífugas utilizaremos un microcontrolador, que estará encargado de procesar y ejecutar los comandos que utilice el usuario para adecuar las señales a los parámetros deseados en cada caso, además esta señal debe pasar por un debido acondicionamiento tanto para modificar sus parámetros como para que pueda ser utilizada en conjunto con el sistema de adquisición de datos de la planta de estudio.

En cuanto a la señal de fricción estática dadas las condiciones de la señal deseada será conveniente producirla directamente por hardware, por lo que también debe recibir un acondicionamiento de señal.

Finalmente para el entorno de usuario se deberá emplear elementos que permitan al usuario manipular el sistema y tener conocimiento de cómo lo está manipulando.

3.2. Diagrama de bloques

En la figura 3.1 se muestra el diagrama de bloques general del sistema de emulación de falla, esto debido a que tanto para la emulación de fallas en términos generales tenemos bloques que son similares, o deben estar presentes en cualquier caso. Se muestran la interfaz de usuario, la generación de señales de falla, el acondicionamiento de señal, la fuente de alimentación del sistema y finalmente también se incluye el bloque de adquisición de datos, que a pesar de pertenecer estrictamente a la planta y no al sistema de emulación de fallas debe considerarse para efectuar el diseño del sistema de emulación de fallas, y en algunos casos podrá ser incluido como parte del sistema de emulación de manera que sea directamente el protocolo de comunicación con una computadora o controlador.

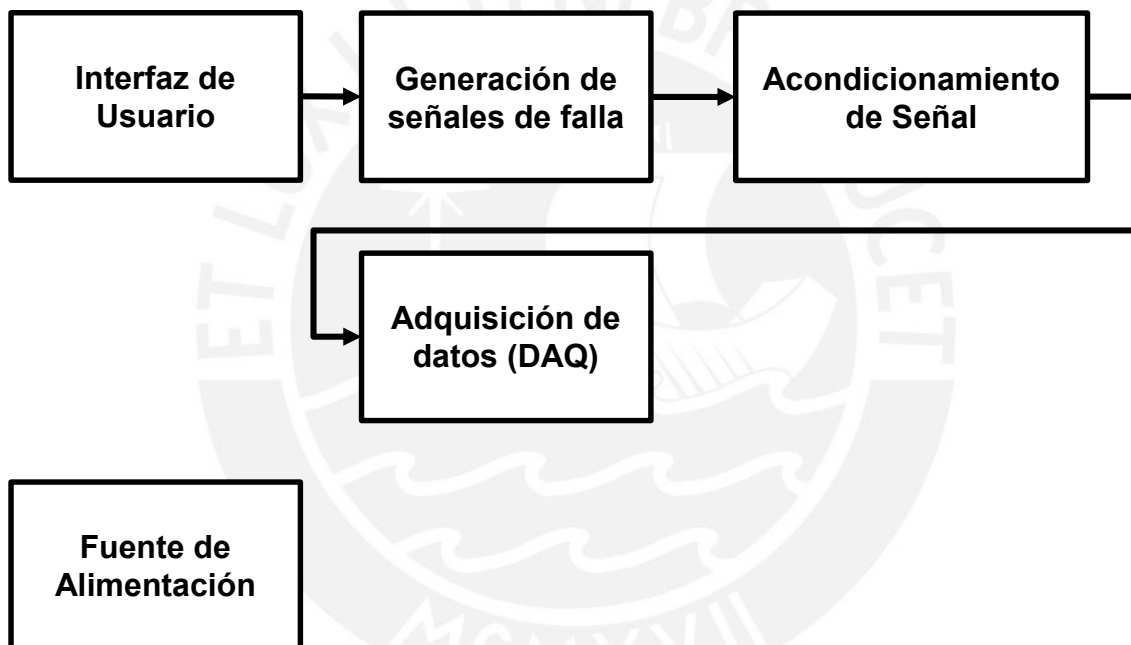


Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema

Es posible que se requiera en algún caso la combinación de hardware y software, por ello primero se describirá el hardware y posteriormente el software que corresponda a cada etapa.

3.3. Diseño del sistema de emulación de fallas

3.3.1. Bloque Interfaz de usuario

Requerimientos

- Visualización de datos (frecuencia o modo de las señales)
- Teclado, botones o elementos para configuración de parámetros.

Display

Para el visualizador dónde se mostrará la frecuencia y modo se utilizará un display LCD 16x2 que se muestra en la figura 3.2.

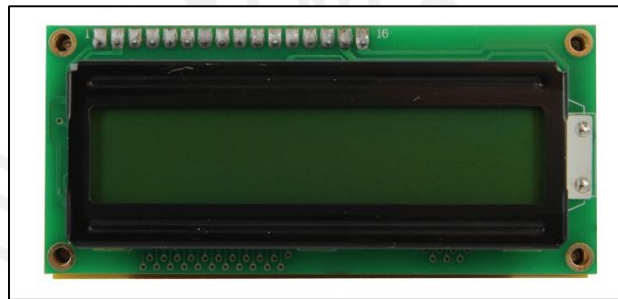


Figura 3.2: Display LCD 16x2

Este display se ha escogido puesto que es uno de los más populares en el mercado, existen múltiples librerías distribuidas de manera libre para su control además de su bajo costo.

Este display es capaz de mostrar todos los caracteres del código ASCII, así como caracteres que el usuario puede definir a través de software de edición gráfica especializados. En la figura 3.3 se muestra la distribución de pines, según la hoja de datos que proporciona el fabricante, que serán usados así como el esquemático del circuito correspondiente a esta etapa.

PIN NUMBER	SYMBOL	FUNCTION
1	Vss	GND
2	Vdd	+ 3V or + 5V
3	Vo	Contrast Adjustment
4	RS	H/L Register Select Signal
5	R/W	H/L Read/Write Signal
6	E	H →L Enable Signal
7	DB0	H/L Data Bus Line
8	DB1	H/L Data Bus Line
9	DB2	H/L Data Bus Line
10	DB3	H/L Data Bus Line
11	DB4	H/L Data Bus Line
12	DB5	H/L Data Bus Line
13	DB6	H/L Data Bus Line
14	DB7	H/L Data Bus Line
15	A/Vee	+ 4.2V for LED/Negative Voltage Output
16	K	Power Supply for B/L (OV)

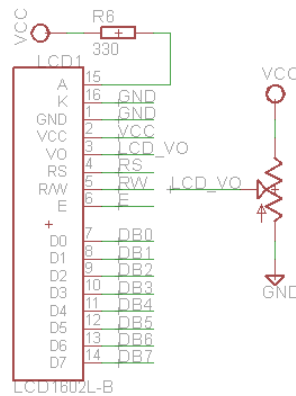


Figura 3.3: Distribución de pines y esquemático de pantalla LCD 16x2 [21]

Comando

En el caso del microcontrolador se utilizarán interruptores para ingresar la selección correspondiente a los modos de falla que se tengan preestablecidos. El programa se encargará de revisar el estado de los interruptores de manera rutinaria para saber qué modo se debe ejecutar.

Los interruptores serán del tipo DIP, para poder incluirlos dentro de una tarjeta de circuito impreso. En la figura 3.4 se muestran los interruptores de tipo DIP a emplearse.

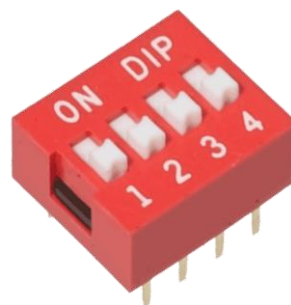


Figura 3.4: Interruptores DIP

3.3.2. Bloque generación de señales de falla

Fallas en válvulas

La variación de nivel será dada directamente por el giro en el elemento rotativo del potenciómetro, y la variación de resistencia y voltaje que se genera en consecuencia.

Como mencionamos anteriormente en el capítulo 2 la falla que se desea recrear es la de fricción o atasco en la válvula debido al desgaste de las piezas que la componen. Para recrear este efecto utilizaremos únicamente hardware. En este caso será un potenciómetro lineal, cuya resistencia variable al estar conectado a un nivel de tensión específico generará variaciones las cuales pueden ser manipuladas por el usuario, para definir los parámetros de variación se debe estudiar las tensiones admitidas por la planta. Estos parámetros se regularan de manera adecuada con el bloque de acondicionamiento de señal.

En la figura 3.5 se muestra el circuito propuesto para la generación de la señal de falla en válvula. El valor de variación de resistencia del potenciómetro utilizado, según su hoja de datos es menor o igual al 5% de su resistencia total y la resistencia mínima que ofrece es de 15Ω . Dado que la VCC en nuestro caso corresponde a 5V utilizaremos un potenciómetro de $1K\Omega$.

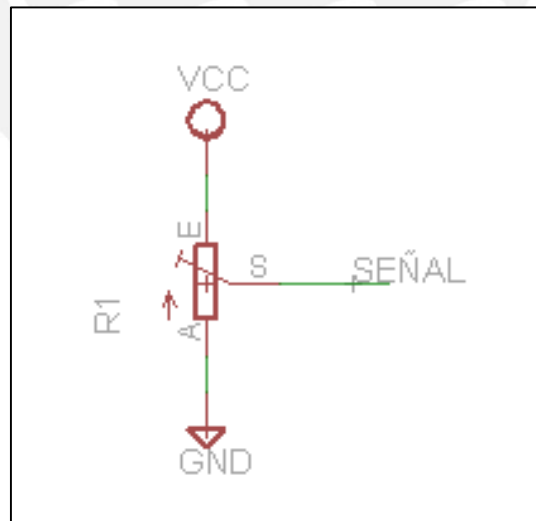


Figura 3.5: Circuito para generación de señal de falla en válvulas

Fallas en bombas

Hardware

Requerimientos del sistema:

- Cumplir con generación de formas de onda a las frecuencias correspondientes a las fallas.
- 2 pines comando
- 11 pines de control de la Pantalla LCD 16x2 (8 pines de datos + 3 control)
- 2 pines con salida PWM para generación de formas de onda
- 1 pin de reset.
- Pines libres para futuras mejoras del sistema

Después de plantear los requerimientos específicos del microcontrolador necesario se ha realizado el cuadro comparativo con alternativas que se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Cuadro comparativo de microcontroladores

Microcontrolador	PIC16F84	PIC18F452	Atmega8L	Atmega16a
Cantidad de pines	18	40	28	40
Alimentación	2-5.5V	2-5.5 V	2.7-5.5 V	2.7-5.5V
Frecuencia de oscilación máxima con cristal externo	10MHz	40 MHz	16 MHz	16MHz
Memoria Flash	1Kbyte	32Kbytes	8Kbytes	16Kbytes
Interrupciones Externas	1 pin	3 pines	2 pines	2 pines
Costo (S/.)	12	19	12	15

Luego de analizar el cuadro anterior se tienen como opciones factibles a los microcontroladores PIC16F84 y Atmega8L, dado que cumplen con los requerimientos y tienen bajo costo, pero finalmente se ha escogido el Atmega8L como propuesta de solución dada la familiaridad con los microcontroladores de la marca Atmel. Adicionalmente utilizaremos un cristal externo de cuarzo para darle mayor precisión a la frecuencia de oscilación, este cristal será de 8MHz.

Software

El programa de generación se basa principalmente en lograr un sintetizador digital directo (DDS), el cual es uno de los métodos más usados para la generación de señales arbitrarias. Este método de generación de señales permite obtener una variación muy

exacta en frecuencia, y reconstruye fácilmente estas señales con valores que han sido precargados en memoria, en este caso del microcontrolador.

Además de la generación de señales el software debe permitir interacción entre el usuario y el sistema, de manera que pueda manipular los parámetros que le interesan, y debe también controlar el display LCD para facilitar la tarea de variación de parámetros para el usuario.

El programa principal se basa en interrupciones temporales, se ejecuta una tarea cada cierto tiempo, dado que existen varias tareas como escribir los parámetros en la pantalla LCD, corregir el valor que se debe cargar en el registro de PWM, entre otras. De esta manera al usar interrupciones por tiempo se da una impresión de estar trabajando con tareas en simultáneo.

En la figura 3.6 se muestra el diagrama de flujo del programa principal. Este se basa en cambio de tareas, para ello se utiliza el temporizador interno del microcontrolador para designar cambios de tarea. Lo esencial de esta sección del programa es el guardado de registros en la pila, de manera que cada tarea tiene su propio segmento de pila y no se pierde el estado actual.

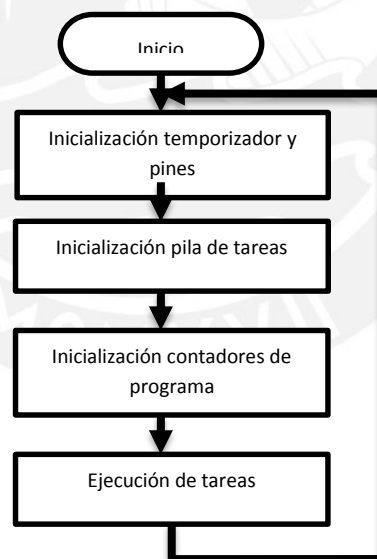


Figura 3.6: Programa Principal

Adicionalmente se muestra a continuación el servicio de interrupción requerido por el programa para efectuar el efecto multitarea simultánea. Se detalla el salvamento y recuperación de registros de tarea en la el diagrama de flujo de la figura 3.7.

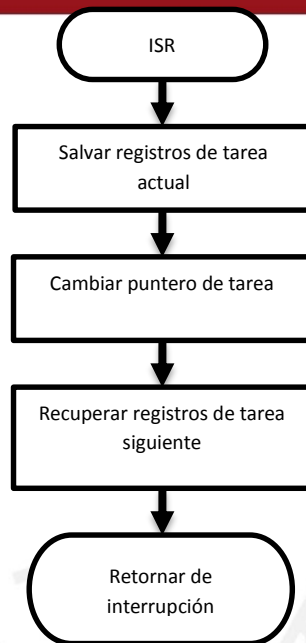


Figura 3.7: Diagrama de flujo de la interrupción de multitarea

Del mismo modo se muestra en la figura 3.8 el cuadro “Ejecución de tareas” de la figura 3.6 de manera detallada. En este se lee la entrada del sistema y se imprime un mensaje en el display LCD y finalmente se generan las señales deseadas, esto mediante 2 canales de PWM.

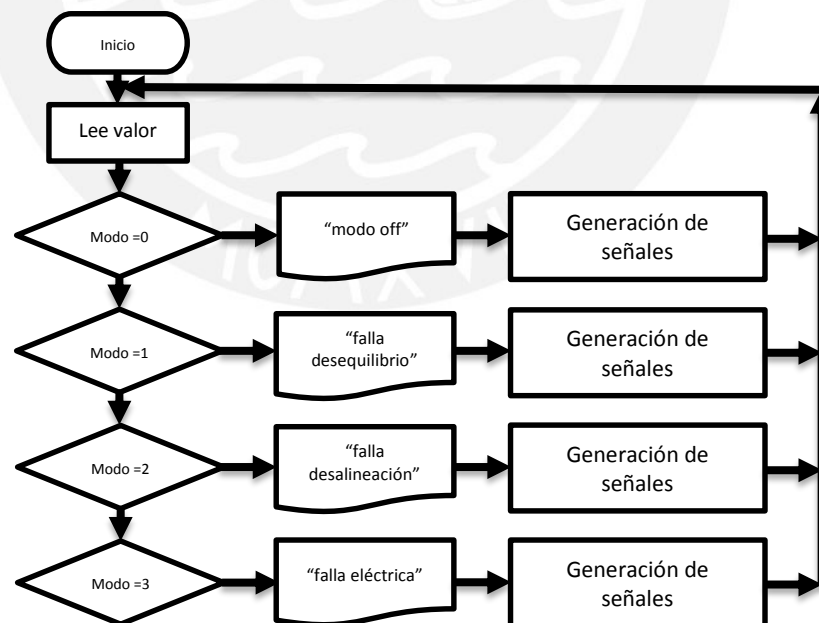


Figura 3.8: Diagrama de flujo de “Ejecución de tareas”

Finalmente la tarea más importante es la de generación de señales, utilizando la modulación por ancho de pulsos en combinación con un filtro pasabajos (que será

diseñado y descrito en la sección de acondicionamiento de señal), esta salida de modulación por ancho de pulso se genera para 2 de las salidas de pwm que ofrece el microcontrolador, en los pines OC1A y OC2. En la figura 3.9 se muestra el diagrama de flujo de las rutinas de interrupción simplificadas para generación de PWM, en ellas se puede apreciar el control de las salidas.

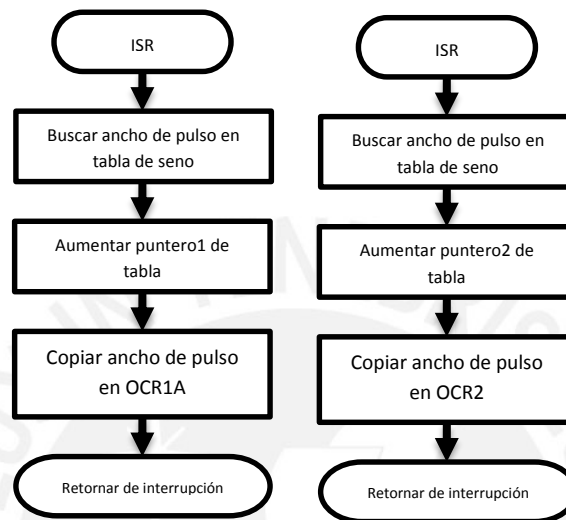


Figura 3.9: Diagrama de flujo de las rutinas de interrupción de generación de PWM

3.3.3. Bloque de adquisición de datos (DAQ)

Como se mencionó antes este bloque no pertenece estrictamente al sistema de emulación de fallas, pero no puede ser dejado de lado puesto que será un elemento que condicione algunos parámetros de las señales generadas, de manera que deberán ser manipuladas en la etapa de acondicionamiento de señal para que se pueda trabajar con el sistema de adquisición de datos.

En este caso la tarjeta de adquisición de datos que se encuentra instalada en la planta intercambiadora de calor es la National Instruments PCI-6229, cuyas características generales se muestran a continuación organizadas en la tabla 3.2 a manera de resumen, todas ellas han sido tomadas de la hoja de datos proporcionada por el fabricante.

Tabla 3.2: Resumen de características de tarjeta de adquisición de datos “National Instruments PCI-6229”

Bus de datos	PCI, PXI, USB
Entradas analógicas	32 de 16 bits
Salidas analógicas	4 de 16 bits
Rango de entradas analógicas	Programable: $\pm 10V$, $\pm 5V$, $\pm 1V$, $\pm 0.2V$ por canal
Rango de salidas analógicas	$\pm 10V$

De la tabla anterior son de interés principalmente los rangos de voltaje que se pueden alcanzar, se tomará como referencia que $\pm 10V$ es el límite, aun cuando la hoja de datos del fabricante indica que existen dispositivos de seguridad incluidos en la tarjeta para voltajes mayores. Para ello se debe acondicionar las señales para que puedan ser ampliadas o reducidas según sea el efecto que se quiera observar, del mismo modo corresponde en algunos casos la necesidad de agregar un nivel DC de offset a las señales producidas.

3.3.4. Bloque de acondicionamiento de señal

En base a lo analizado en la sección anterior que corresponde al sistema de adquisición de datos que se empleará se ha tomado lo siguiente como necesario:

- Ganancia variable de la señal, simétrica respecto a la referencia y con máxima amplitud 10V.
- Nivel DC de offset disponible para la señal.

- Debido a que según estándares la válvula es controlada y envía respuesta en un rango de 4-20mA la señal debe ser convertida a voltaje de manera que sea admisible para la tarjeta de adquisición de datos.

Acondicionamiento de señal para válvulas

Como mencionamos antes debemos hacer una conversión de corriente a voltaje, además de agregar el offset que representa a la falla. Para dicha tarea se deben seleccionar componentes apropiados, principalmente los amplificadores operacionales que se van a utilizar. En la tabla 3.3 se presentan los amplificadores operacionales que se tomaron como posibles alternativas para la solución de lo requerido, y se presentan sus características de interés. Estas han sido tomadas de sus hojas de fabricante y el precio es referencia de la página web <www.digikey.com> que vende componentes electrónicos.

Tabla 3.3: Cuadro comparativo de amplificadores operacionales

Amplificador Operacional	LM741	LM358
Cantidad de pines	8	8
Alimentación	$\pm 18V$	$\pm 16V$
Slew rate	0.5V/us	0.6 V/us
Número de OPAMPs en el empaque	1	2
Costo (\$ USD)	\$0.7	\$0.34

Dada la tabla anterior se escoge el LM358, puesto que es un circuito integrado que ofrece 2 amplificadores operacionales en un mismo empaque, tiene la posibilidad de utilizar una fuente simétrica para obtener valores positivos y negativos, tiene buena respuesta de cambio de voltaje (slew rate) y además su costo es bastante bajo.

Para cumplir con el objetivo propuesto de conversión de corriente a voltaje y adición de offset se propone el siguiente circuito, el cual consta de 3 partes principales: conversión de corriente a voltaje, generación del offset (que se mencionó como generación de señal de falla anteriormente) y etapa de suma de señales. El circuito propuesto se muestra en la figura 3.10, en la que se detalla cuáles son las etapas mencionadas.

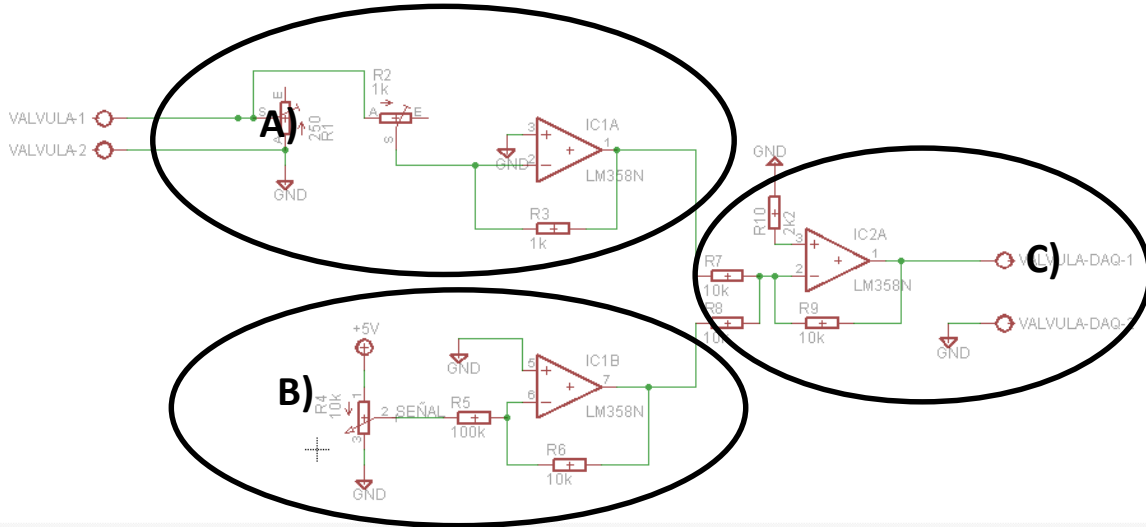


Figura 3.10: Circuito de acondicionamiento de señal para válvulas, A) Conversor Corriente-Voltaje, B) Acondicionamiento de offset, C) Sumador de señales

Acondicionamiento de señal para motor

Hemos mencionado que las señales que corresponden a falla de motor se generan por modulación por ancho de pulso, para ello se debe hacer uso de un filtro pasabajos. Adicionalmente se debe agregar una etapa que permita sumar las señales, puesto que la señal final es composición de una o más señales senoidales. Se incluye el requerimiento de poder variar el nivel de amplitud de las señales que se suman, y agregar un offset final a la señal de interés, para llegar a parámetros deseados.

Entonces, se trabajará con un filtro Chebyshev π , compuesto por capacitores e inductores. La frecuencia de corte establecida es de 1000Hz aproximadamente (esto debido a que se usarán valores comerciales en los componentes), mucho mayor a la máxima frecuencia de las señales que se pretende generar, de manera que no afecte a las señales de interés. A continuación en la figura 3.11 se muestra dicha configuración.

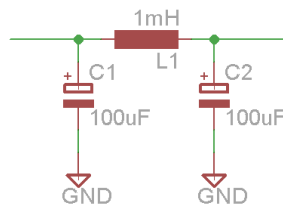


Figura 3.11: Filtro Chebyshev π , Frecuencia de corte: 1000Hz aprox.

Para la modificación de la amplitud de la señal se utilizará el circuito amplificador inversor con ganancia variable utilizando un potenciómetro de 50kΩ.

Dado que la fuente empleada será simétrica no existe problema para conseguir valores negativos de voltaje. Sin embargo se debe limitar la máxima ganancia para que no sobrepase la amplitud de 5V (tomando en cuenta que a suma de ambas señales con un máximo de 5V nos dará una señal de 10Vpp). Para limitar esta ganancia se trabaja con las ecuaciones de la configuración de amplificador inversor.

La ecuación principal de voltaje de salida para la configuración es la que se muestra a continuación:

$$V_o = -\frac{R_f}{R_i} \times V_i \quad \text{Ec (1)}$$

Dado que la resistencia R_f puede variar de 15 a 50KΩ, del mismo modo la ganancia absoluta de este amplificador podría llegar hasta 5 usando una resistencia de 10KΩ, sin embargo por limitaciones de voltaje de alimentación del integrado LM385 llegará como máximo a 10V (aproximadamente 2V por debajo del valor de alimentación, en esta caso considerado 12V para satisfacer el requerimiento de voltaje). A continuación, en la figura 3.12 se muestra el esquemático del circuito propuesto, para un canal.

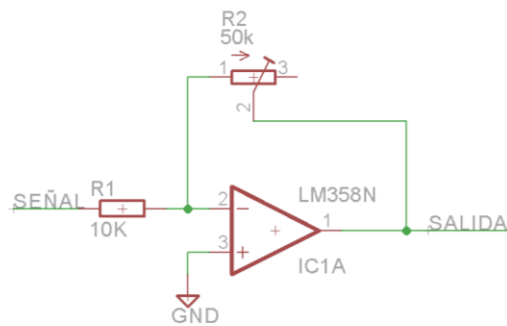


Figura 3.12: Etapa de amplificación de señal

Finalmente se deben sumar las señales que corresponden a ambos canales, y de ser necesario agregarles un nivel de offset. Para dicha tarea se utilizará la configuración de sumador inversor, que además termina por invertir nuevamente las señales y las deja en términos positivos. En la figura 3.13 se muestra el circuito propuesto, la ganancia de cada canal es equivalente a 1 y el máximo offset podría llegar hasta los 5V.

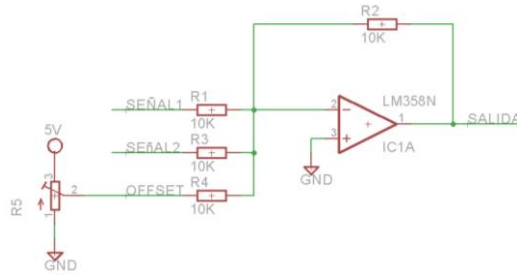


Figura 3.13: Sumador de señales y offset

3.3.5. Fuente de alimentación para el sistema

Para el diseño de la fuente de alimentación se debe revisar el consumo de los componentes del sistema, así como las exigencias específicas. La principal exigencia en cuanto a voltaje es que se requiere voltajes de $\pm 12V$ para la alimentación de los amplificadores operacionales, así como voltaje de $+5V$ para la alimentación de otros componentes como el microcontrolador, el display LCD 16x2 y los elementos que sirven para generar offsets. A continuación se muestra en una tabla 3.4 con el detalle de los consumos energéticos de los elementos del sistema.

Tabla 3.4: Detalle de consumo energético

Elemento	Especificación	Cantidad de corriente (mA)
Pantalla LCD 16x2	Luz LED de fondo	40
	7 pines de control	3x7
Microcontrolador ATmega8	Modo Activo	3.6
	E/S de comando consumo máximo	40x4
Amplificador operacional LM358	Corriente máxima por empaque (2 opamps)	20x4
Consumo total estimado		304.6 mA

Finalmente, como requerimiento se trabajará una fuente de 1A para garantizar que el sistema no carezca de energía.

Para la regulación de voltaje se han tomado los reguladores LM7812 y LM7912, para obtener $\pm 12V$ y el regulador LM7805 para obtener 5V. En la figura 3.14 se muestra el diagrama esquemático de la fuente, que es alimentada por un transformador de 220V a 12V.

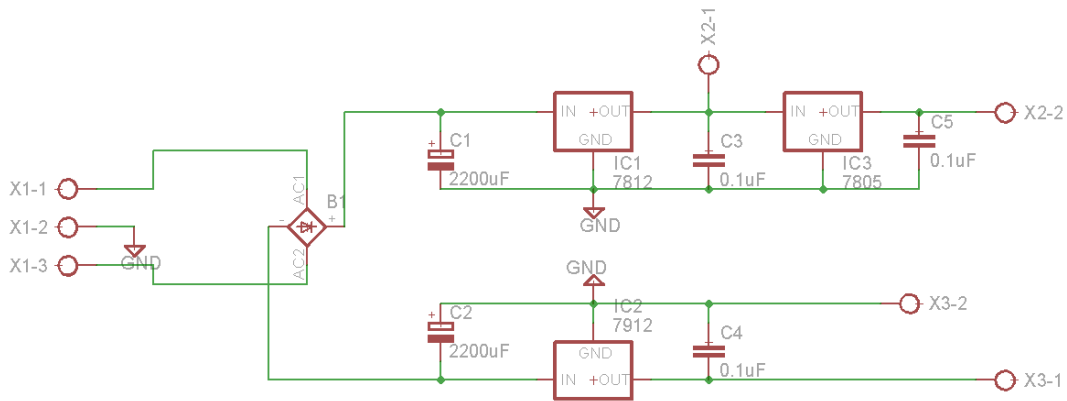


Figura 3.14: Fuente del sistema de emulación de fallas

3.3.6. Diseño final

Finalmente en la figura 3.15 se muestra el esquemático del sistema completo.

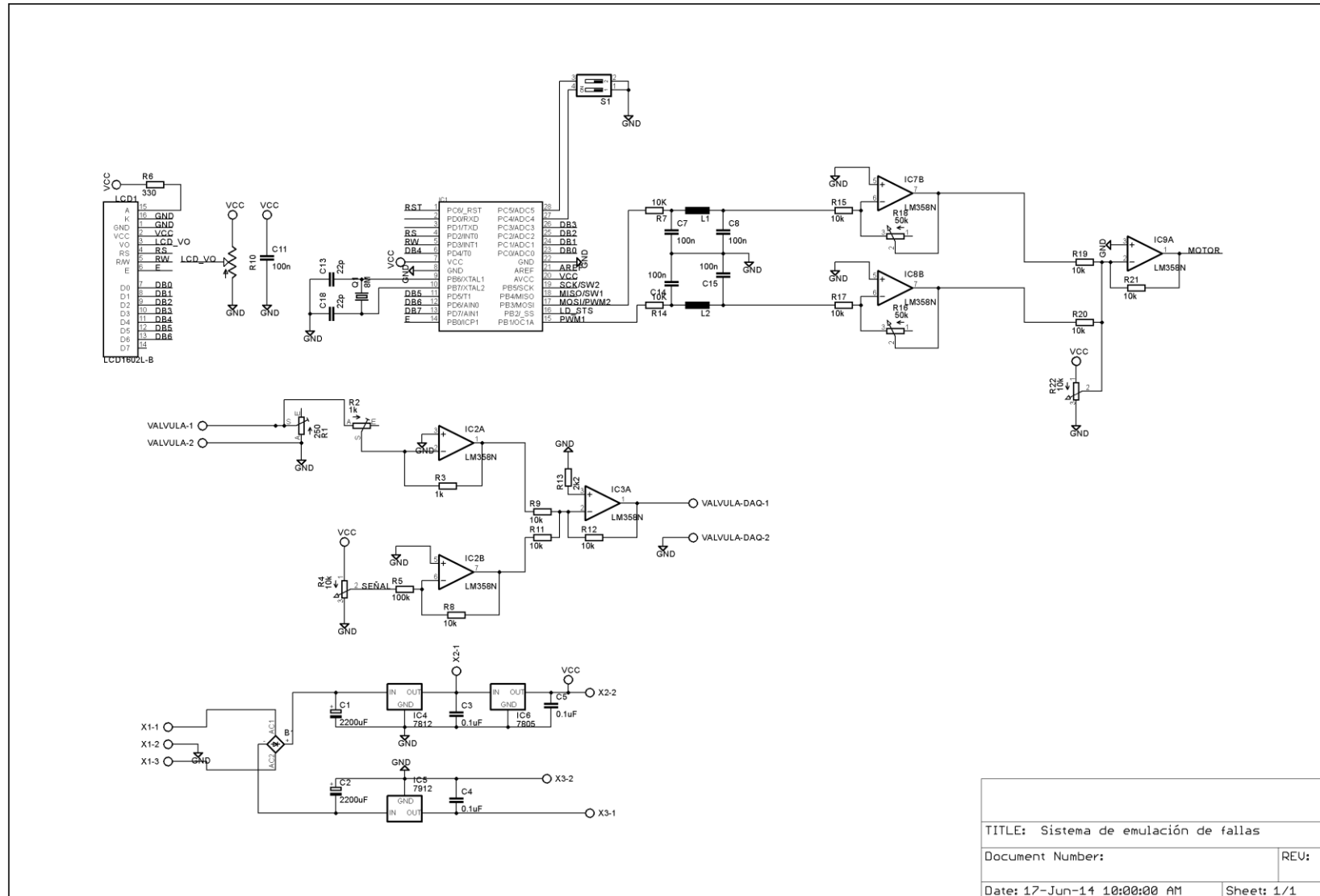


Figura 3.15: Esquemático del sistema de emulación de fallas.

CAPITULO 4

SIMULACIONES, IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS

4.1. Introducción

Para el desarrollo del presente documento se efectuaron una serie de simulaciones y pruebas para analizar las señales generadas de manera que fueran satisfactorias respecto a los requerimientos planteados.

En primer lugar se presentarán las simulaciones realizadas en el software ISIS Proteus. Se presentan simulaciones que corresponden al display LCD y capturas, respecto a las señales generadas, del osciloscopio digital que ofrece este software de simulaciones.

Posteriormente se muestran imágenes que corresponden a la implementación de las tarjetas de circuito impreso que se desarrollaron en base a los diseños presentados en el capítulo 3 para satisfacer los requerimientos del sistema de emulación de fallas.

Se presentan también las pruebas que se desarrollaron para el análisis de las señales de fallas, en este inciso se presentan tanto el análisis en el dominio del tiempo como el análisis en el dominio de la frecuencia para las fallas que corresponden a las bombas centrífugas y se muestran los valores extremos que se obtienen con el circuito que corresponde al offset de válvulas.

Finalmente se presentan las tablas de resultados para cada uno de los elementos que se seleccionaron de la planta intercambiadora de calor, y se discuten dichos resultados.

Para las fallas de bombas centrífugas hemos se ha tomado como referencia el análisis de vibraciones, las señales generadas deberán ser introducidas directamente al computador donde se encuentran los sistemas de diagnóstico de fallas que corresponden a este elemento, se debe utilizar una tarjeta de adquisición de datos adecuada. En este caso específico una tarjeta de adquisición de datos cuyas lecturas sean de voltaje.

Para la falla de fricción en válvulas que se ha estudiado hemos determinado que el offset generado debe estar dentro de un rango adecuado para que un sistema de detección de fallas pueda reconocerlo adecuadamente. En este caso para la lectura adecuada también se debe utilizar una tarjeta de adquisición cuyas lecturas sean de voltaje, y se debe conectar

la lectura que se tiene de la válvula (rango de 4-20mA) en el conector adecuado del sistema de emulación de fallas de manera que se pueda agregar el efecto de falla deseado.

4.2. Simulaciones

Para las simulaciones que corresponden a cada etapa se utilizó el software ISIS Proteus, que permite diseñar esquemáticos y analizar su comportamiento bajo ciertos parámetros de simulación. Funciona para componentes analógicos, digitales e inclusive para evaluar el comportamiento de microcontroladores programados.

Se mostrarán las siguientes simulaciones:

- Imágenes de display LCD
- Capturas de osciloscopio digital, para señales de PWM, filtradas y reconstruidas, y para offset de válvulas.
- Capturas de osciloscopio digital de la suma de las señales, es decir las señales de falla propiamente.

Display LCD

Se mostrarán las imágenes de las simulaciones que corresponden a las simulaciones de los mensajes que se muestran en el display LCD, estos corresponden a los modos de falla y el mensaje de bienvenida.

En la figura 4.1 se muestra el mensaje de bienvenida para el menú de selección de fallas de motor.



Figura 4.1: Mensaje de bienvenida menú

En la figura 4.2 se muestran los 4 mensajes que corresponden a los posibles estados del sistema: A) Falla desequilibrio, B) falla desalineación, C) falla eléctrica y D) modo off, este último no genera señal.

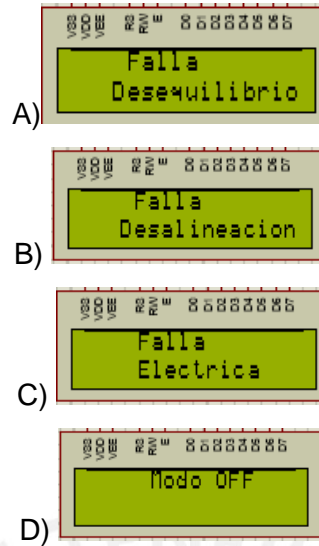


Figura 4.2: Mensajes de estado: A) Desequilibrio, B) Desalineación, C) Falla Eléctrica, D) Modo OFF

Señales

En esta sección se mostrarán las imágenes que corresponden a las simulaciones de las señales de manera independiente. En primer lugar una captura de imagen que corresponde a una onda PWM que generará la frecuencia principal de 57.5Hz a la que trabaja la bomba y se encuentra presente en todas las señales que analizamos para bombas. Luego se muestran las señales de falla de desequilibrio, falla de desalineación y falla eléctrica. Finalmente mostraremos el máximo y mínimo nivel de offset que se puede alcanzar para válvulas con el circuito propuesto.

En la figura 4.3 encontramos la señal PWM sin filtrar, esta es la señal básica para la generación de señales en el sistema de emulación de fallas.

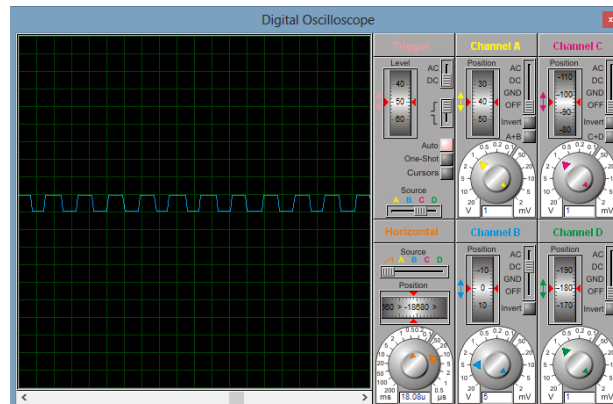
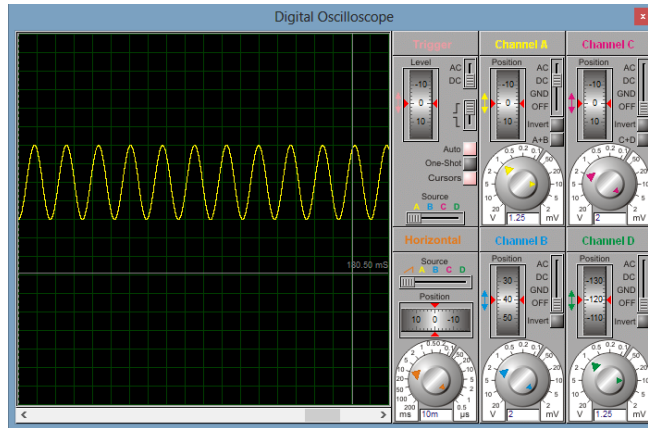
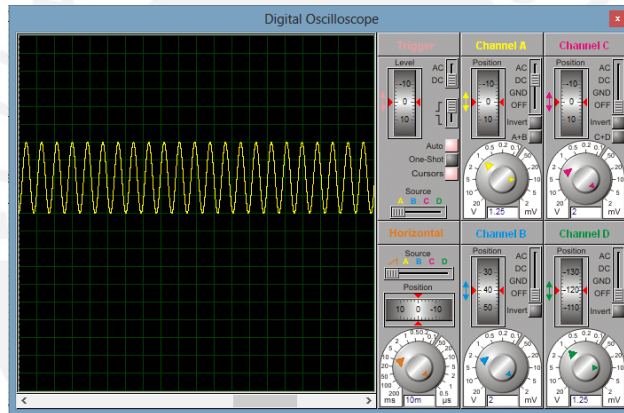


Figura 4.3: Onda PWM para generación de señal senoidal

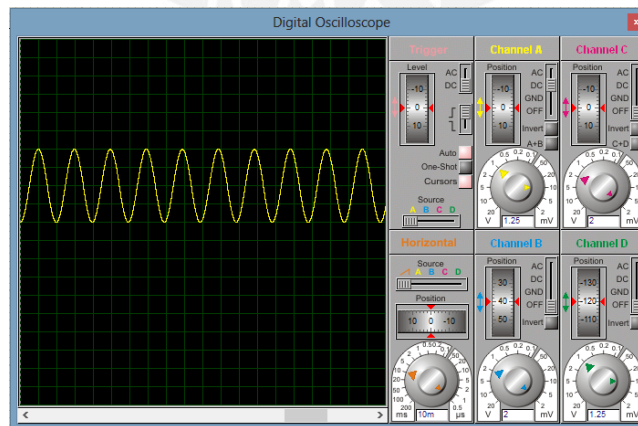
En la figura 4.4 se muestran las señales senoidales generadas que corresponden a A) 57.5Hz, B) 115Hz y C) 50Hz.



A) Señal senoidal 57.5HZ



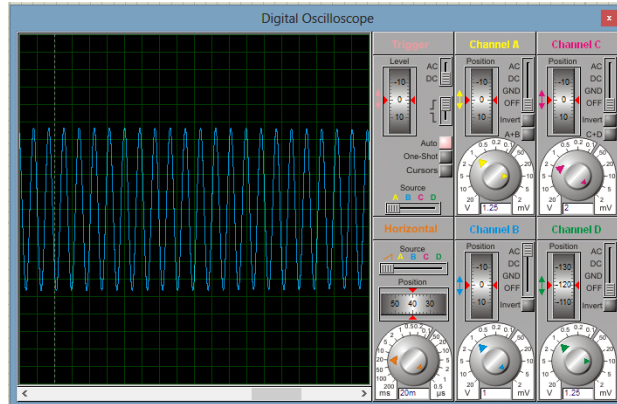
B) Señal senoidal 115Hz



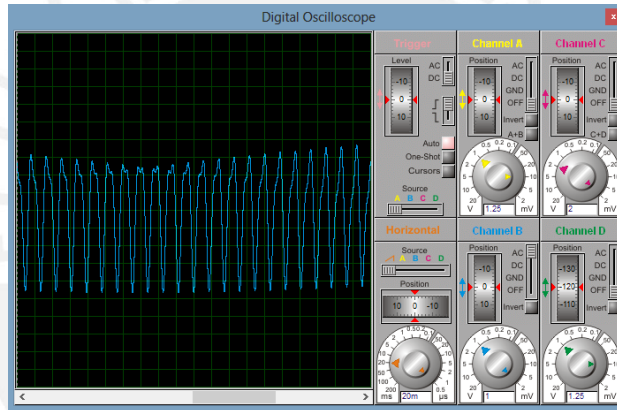
C) Señal senoidal 50Hz

Figura 4.4: Señales senoidales para construcción de señal de falla

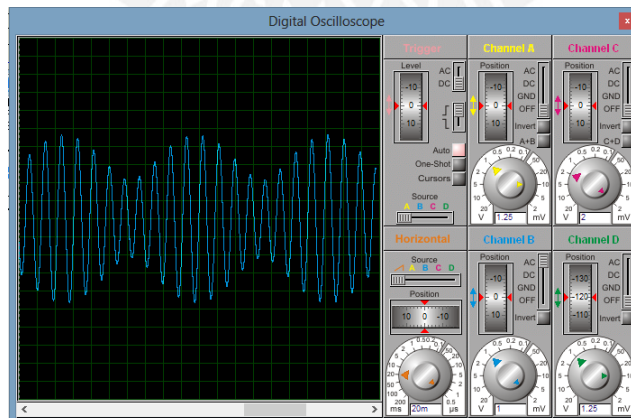
En la figura 4.5 se muestran las simulaciones que corresponden a la suma de señales senoidales, es decir la simulación de las señales de falla propiamente.



A) Falla de desequilibrio



B) Falla de desalineación



C) Falla eléctrica

Figura 4.5: Simulación de señales de falla

En la figura 4.6 se presenta la señal de offset que corresponde a la falla en válvula, se incluyen cursores de amplitud para el máximo y mínimo valor generado.

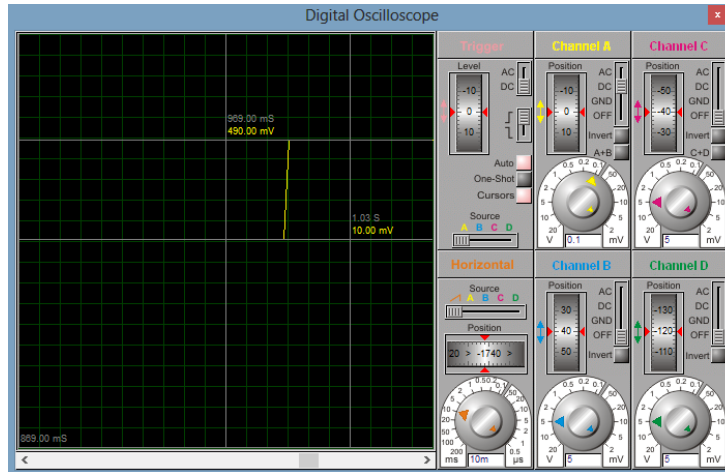


Figura 4.6: Señal de falla en válvula, valor mínimo 10mV y valor máximo 490mV

4.3. Implementación

Todos los circuitos fueron diseñados en el software Eagle 6.1.0, de estos se generó las pistas y se desarrolló las tarjetas de circuito impresas. Con la implementación se hicieron las pruebas para verificar el correcto funcionamiento del diseño. En la figura 4.8 se muestran imágenes de algunas de las tarjetas desarrolladas. En la figura 4.7 se muestra el montaje final para pruebas.

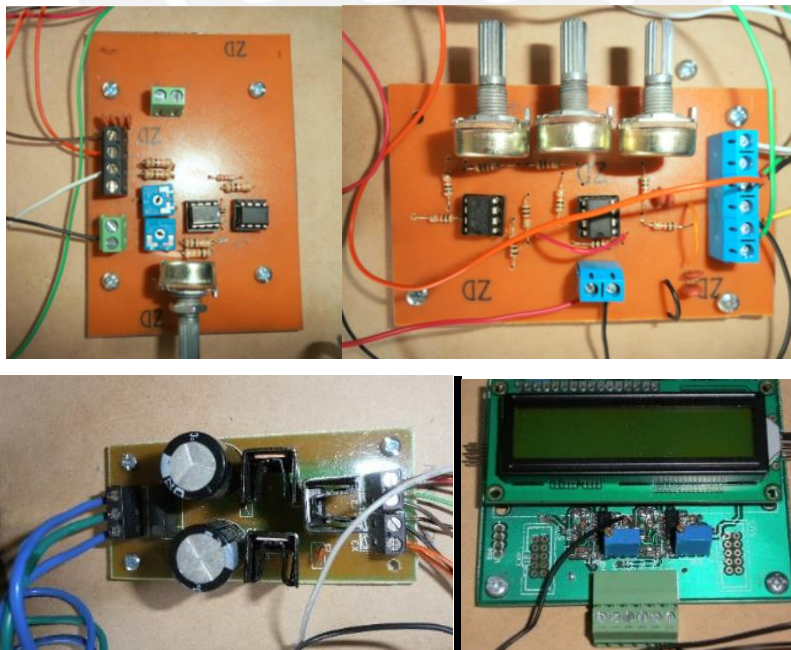


Figura 4.7: Tarjetas desarrolladas para el sistema de emulación de fallas

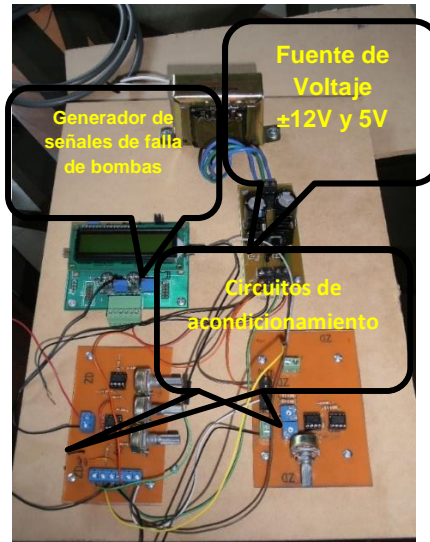


Figura 4.8: Montaje del sistema para pruebas

Costos

En la tabla 4.1 se muestra el análisis de costos para el desarrollo del sistema propuesto.

item	descripción	cantidad	Precio (Nuevos soles)	
			Precio unitario	Precio total
1	Microcontrolador Atmega8	1	12	12
2	Display LCD	1	8	8
3	Diseño	1	600	600
4	Componentes Varios	1	200	200
5	Mano de obra	1	500	500
6	Gastos diversos	1	500	500
			Subtotal	1820
			IGV (18%)	327.6
			Total	2147.6

Tabla 4.1: Costo de desarrollo del sistema propuesto

4.4. Pruebas

Las pruebas se han realizado con osciloscopio Tektronik TBS 1102, de 2 canales que trabaja a 100MHz (1 000 000 muestras por segundo) como máximo, este osciloscopio ofrece análisis en tiempo y la opción de análisis de frecuencia, el cual nos interesa de manera particular para las señales que corresponden a bombas centrífugas. Mostraremos los resultados que corresponden a todas las señales generadas de manera individual, como

señal de falla y el espectro de la transformada rápida de Fourier para corroborar que su respuesta en frecuencia es la adecuada.

Falla de desequilibrio

Como hemos mencionado la falla de desequilibrio que ocurre en bombas centrífugas se presenta como una excitación o amplificación de la frecuencia natural de vibración de la bomba. Es decir, mayor amplitud en la señal que se registra pero a una misma frecuencia de operación, en nuestro caso 57.5Hz aproximadamente.

En la figura 4.9 se muestran las señales que generan la señal de falla de desequilibrio, la falla emulada y la respuesta de la falla en frecuencia.



Figura 4.9: Componentes de señal de falla, señal de falla de desequilibrio y respuesta en el dominio de la frecuencia

Falla de desalineación

En lo que respecta a la falla de desalineación se ha analizado como la suma de dos señales independientes, la primera es la señal de vibración natural de la bomba y la segunda es una componente de vibración al doble de frecuencia, en este caso la suma de una señal de 57.5Hz y una señal de 115Hz.

En la figura 4.10 se muestran las señales que generan la falla de desequilibrio por separado, la falla emulada y la respuesta en frecuencia de dicha señal de falla emulada.

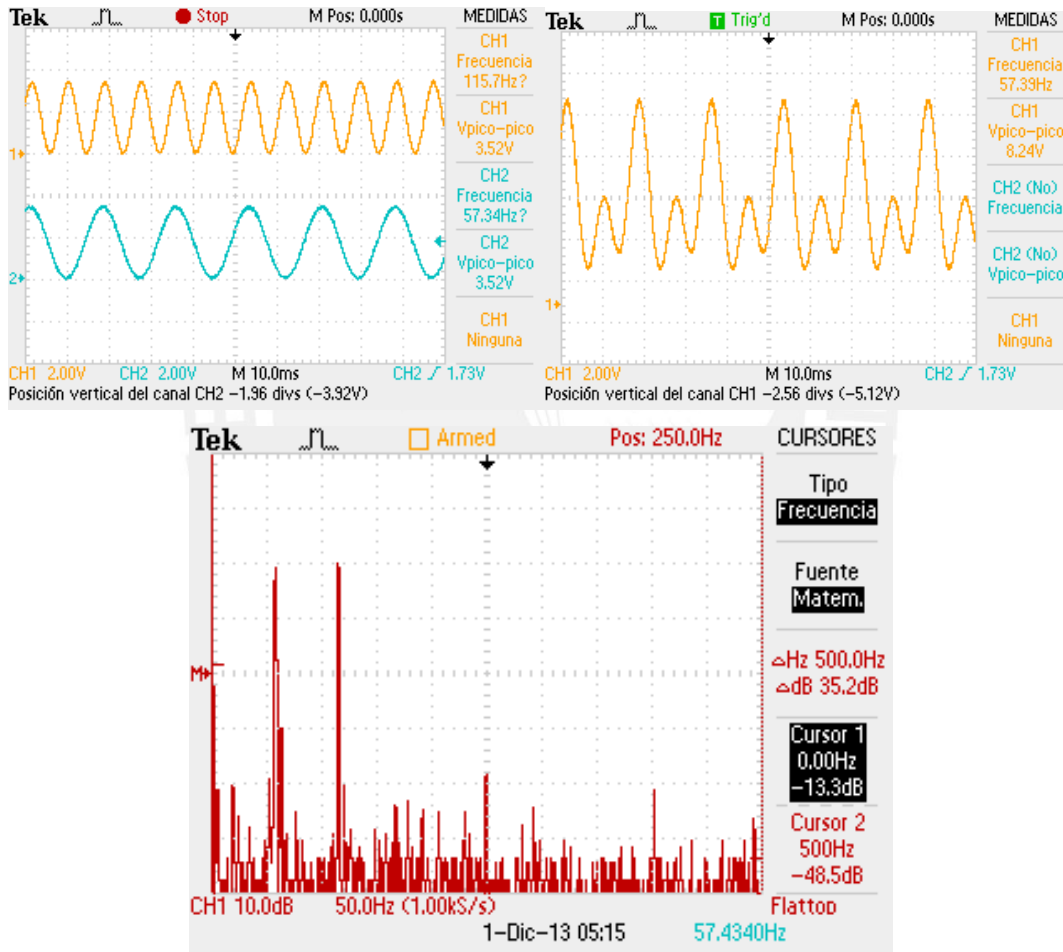


Figura 4.10: Componentes de señal de falla, señal de falla de desalineación y respuesta en el dominio de la frecuencia

Falla eléctrica

Las fallas eléctricas se pueden dar a varias frecuencias (50Hz, 100Hz, 150Hz) debido a distintos factores, sin embargo para este caso emularemos únicamente la falla eléctrica que ocurre a 50Hz. Esta falla se genera como la suma de la señal de vibración natural de la bomba que estudiamos y la señal de 50Hz.

En la imagen 4.11 se muestran las señales que generan la falla eléctrica, la falla emulada y la respuesta en frecuencia de la señal emulada.

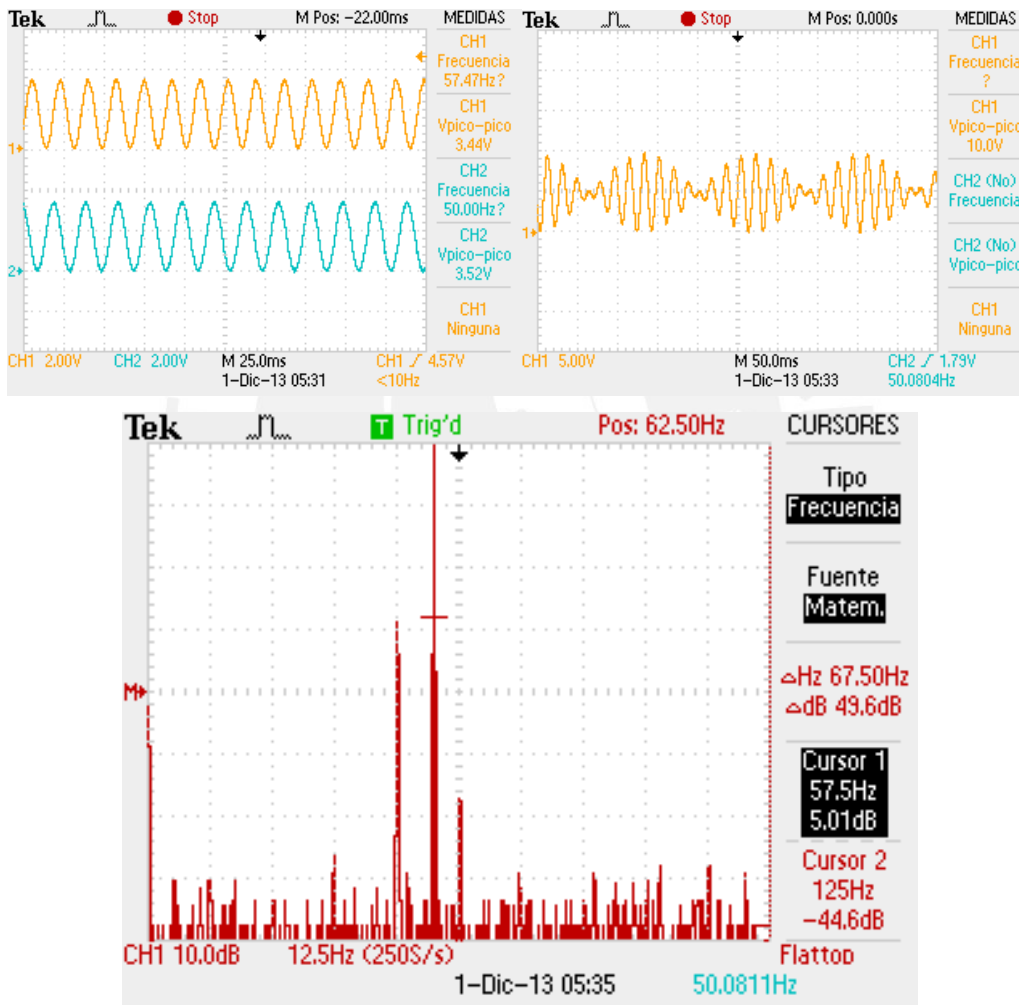


Figura 4.11: Componentes de señal de falla eléctrica, señal de falla eléctrica emulada y respuesta en el dominio de la frecuencia de la señal de falla emulada

Falla de fricción en válvula

Como sabemos la falla de fricción en la válvula varía la señal que se recibe en el controlador entre 0% hasta 10% siendo tolerable el valor hasta 5%, en este caso el 100% de señal es el equivalente a 5V (20mA), por lo cual el valor tope esperado sería de 500mV y el mínimo esperado sería de 0V.

En la figura 4.12 se muestran el valor máximo y mínimo de offset que se ha podido conseguir con el circuito implementado.

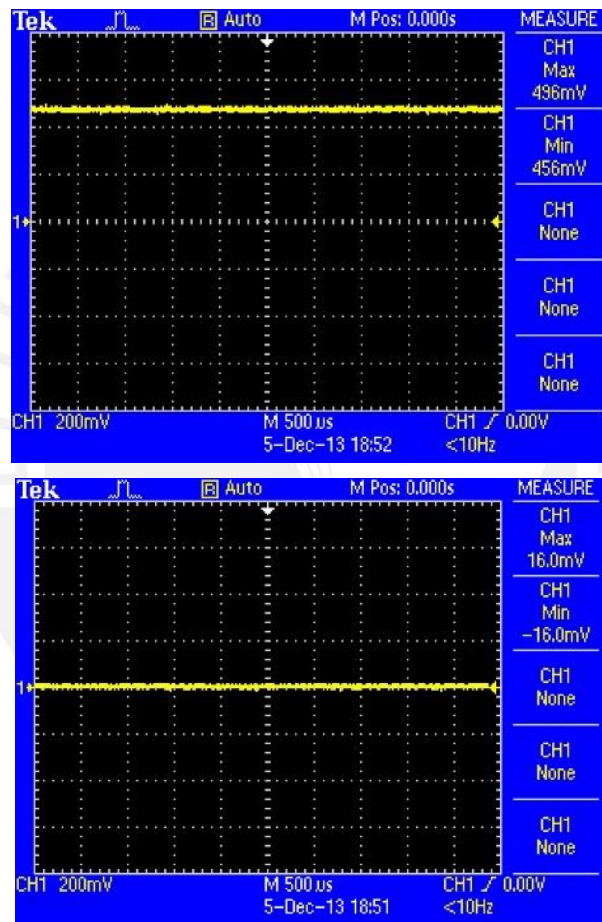


Figura 4.12: Valor máximo y mínimo de offset para válvulas.

4.5. Discusión de resultados

En la tabla 4.2 se muestra un resumen de los resultados experimentales obtenidos durante la etapa de pruebas para las señales concernientes a bombas centrífugas. El factor de interés en la tabla corresponde al número de picos y frecuencia de dichos picos, en el espectro de la señal generada. Se hicieron pruebas variando el voltaje de las señales de entrada que dan lugar a la señal de falla.

Tabla 4.2: Resultados experimentales de señales para bombas centrífugas

Resultados experimentales						
	Parámetros de señales de entrada	Número de Picos (Dom. Frec)	Pico	Frecuencia (Hz)	Amplitud (dB)	Emulación Correcta
Prueba 1	3.4 Vpp 57.5 Hz	1	1	57.5	10.6	Sí Falla de desequilibrio
	3.4 Vpp 57.5 Hz		2	-	-	
Prueba 2	3.4 Vpp 57.5 Hz	1	1	57.5	10.2	Sí Falla de desequilibrio
	5 Vpp 57.5 Hz		2	-	-	
Prueba 3	3.4 Vpp 57.5 Hz	2	1	57.5	4.25	Sí Falla de desalineación
	5 Vpp 114.8 Hz		2	115	5	
Prueba 4	3.4 Vpp 57.5 Hz	2	1	57.5	4.5	Sí Falla de desalineación
	3.4Vpp 114.8 Hz		2	115	5	
Prueba 5	3.4 Vpp 57.5 Hz	2	1	57.5	4.25	Sí Falla eléctrica
	3.4 Vpp 50 Hz		2	51	4.3	
Prueba 6	3.4 Vpp 57.5 Hz	2	1	57.5	4.2	Sí Falla eléctrica
	5Vpp 50 Hz		2	50	5.02	

En la tabla 4.3 se muestran las pruebas experimentales que corresponden a la etapa de offset para válvulas. El factor de interés es el voltaje máximo y mínimo que se pueden conseguir con en el sistema diseñado, así como la proporción total que representa dicho offset.

Tabla 4.3: Resultados experimentales de señal de offset para válvulas

Resultados Experimentales				
		Voltaje (mV)	Porcentaje	Emulación correcta
Prueba 1	Máximo	496	9.92	Sí
	Mínimo	-16	-0.32	
Prueba 2	Máximo	492	9.84	Sí
	Mínimo	25	0.5	
Prueba 3	Máximo	496	9.92	Sí
	Mínimo	-16	-0.32	
Prueba 4	Máximo	495	9.9	Sí
	Mínimo	10	0.2	

Al analizar los resultados se ha obtenido en el caso de las fallas para bombas los resultados esperados, pues las señales en el tiempo representan fielmente a las que aparecerían en bombas centrífugas. El factor de interés principal de este análisis fue el de frecuencia, y se ha corroborado que las señales tienen buena respuesta en el dominio de la frecuencia, por lo que se espera que un sistema de detección de fallas basado en análisis de vibraciones no tendría mayores problemas en detectar estas señales si es que se diseñó de manera adecuada.

En cuanto al offset producido para la falla de fricción en válvulas los valores son cercanos a los esperados: el máximo valor es 496mV y el mínimo es -16mV, esto es probablemente consecuencia de la precisión de las resistencias empleadas así como del ruido que se puede acoplar en el canal.

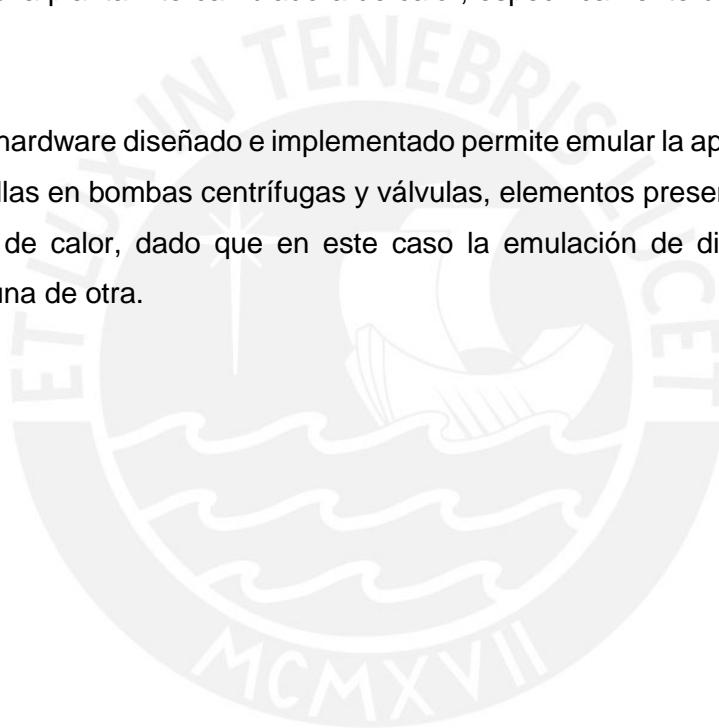
CONCLUSIONES

El sistema de emulación de fallas desarrollado funciona de manera correcta y emula las fallas de desalineación, desequilibrio y falla eléctrica en el caso de bombas centrífugas.

El sistema de emulación de fallas diseñado genera el offset adecuado para ser interpretado como falla de fricción estática en el caso de las válvulas.

Se realizó el estudio de los requerimientos de condición de falla de los instrumentos seleccionados de la planta intercambiadora de calor, específicamente bombas centrífugas y válvulas.

El dispositivo de hardware diseñado e implementado permite emular la aparición simultánea de señales de fallas en bombas centrífugas y válvulas, elementos presentes en una planta intercambiadora de calor, dado que en este caso la emulación de dichas señales son independientes una de otra.



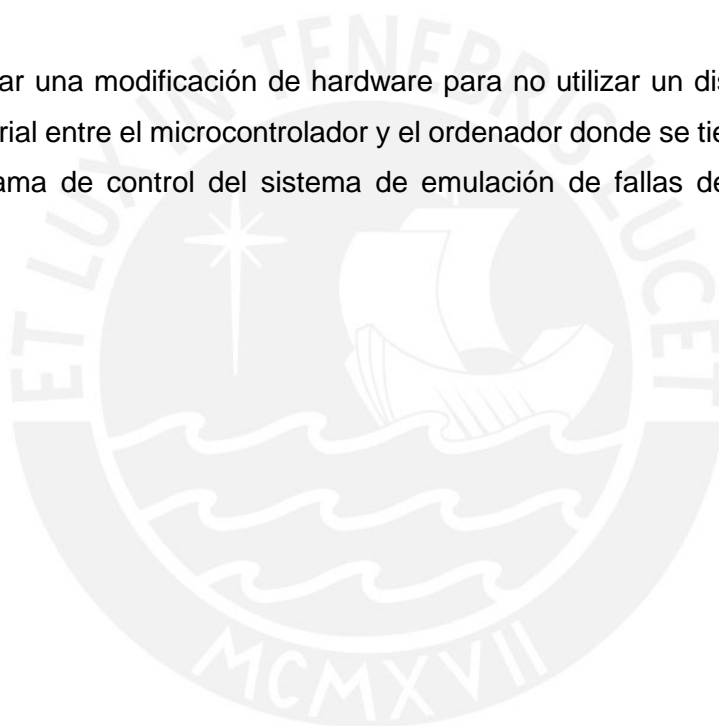
RECOMENDACIONES

Se recomienda hacer pruebas con sistemas de detección de fallas diseñados con el propósito de detectar específicamente las señales de falla que se han emulado.

Se recomienda utilizar componentes pasivos con menor tolerancia de error para obtener aún más precisión.

Dado el bajo consumo del sistema es recomendable reemplazar el transformador de la fuente por batería de manera que sea más portátil.

Es posible realizar una modificación de hardware para no utilizar un display LCD y tener comunicación serial entre el microcontrolador y el ordenador donde se tiene el control de la planta. El programa de control del sistema de emulación de fallas debe ser sencillo e intuitivo.



BIBLIOGRAFIA

[1] Real academia de la lengua española

2009 *Nueva gramática de la lengua española*.

Consulta: 31 de Marzo de 2012

http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=falla

[2] BLANKE, Mogens; Paul M. FRANK; Michel KINNAERT y Marcel STAROSWIECKI .

2003. *Diagnosis and fault detection tolerant control*,

Primera edicion, Nueva York: Editorial Springer.

[3] YAMASHITA ,Yoshiyuki.

2005. "An automatic method for detection of valve stiction in process control loops". *Control Engineering Practice* 14 (2006) pp.503–510

[4] MENDEL,E, T. W. Rauber, F. M. Varejao y R. J. Batista

2009 "ROLLING ELEMENT BEARING FAULT DIAGNOSIS IN ROTATING MACHINES OF OIL EXTRACTION RIGS".

En: 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009)

[5] ISERMANN, Rolf.

2011. *Fault-Diagnosis Applications*.

Primera edicion, Nueva York: Editorial Springer.

[6]HSUEH,Mei-Chen, Timothy K. Tsai, y Ravishankar K. Iyer.

1997. "Fault InjectionTechniques and Tools".

En: IEEE CS Press, California, pp. 314-323.

[7] LOPEZ-ONGIL, Celia, Mario García-Valderas, Marta Portela-García, y Luis Entrena
2007 “Autonomous Fault Emulation: A New FPGA-Based Acceleration System for Hardness Evaluation”.

En: IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 54, NO. 1, pp 252 - 261

[8] J. J. Gertler, Marcel Dekker

1998 Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems. Virginia.

Consulta: Diciembre 2013.

https://www.lehigh.edu/~eus204/workshop/fcw/talks/Gertler_talk.pdf

[9] B. Kuo.

1996 Sistemas de control automático.

Prentice Hall, 7ma edición, 1996

[10] D.R. Espinoza-Trejo

2011 “Detección y Aislamiento de Conjuntos de Fallas de Estator para el Motor de Inducción: Un Enfoque Geométrico”.

En: XVIII International Congress of Electronic, Electrical and Systems Engineering – IEEE INTERCON 2011, 2011.

[11] Atmel Corporation

2003 AVR131: Using the AVR's High-speed PWM.

Consulta: Octubre de 2013

<http://www.atmel.com/Images/doc2542.pdf>

[12] ATMEL

2003 Datasheet Atmega8.

Consulta: 14 de Septiembre de 2012

<http://www.atmel.com/Images/doc2486.pdf>

[13] MANES, Cabanas; Manuel GARCIA; Gonzalo ALONSO; José CANO y Juan SOLARES.

1998. Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas.

Primera edición. España. Ediciones técnicas Marcombo.

[14] Asgeir Kvam.

2009. "Detection of Stiction in Control Valves an Algorithm for the Offshore Oil and Gas Industry".

Norwegian University of Science and Technology.

[15] Tore Hagglund

2011 A shape-analysis approach for diagnosis of stiction in control valves.

En: Control Engineering Practice, Número 19, pp. 782–789.

[16] CHOUDHURY, M.A.A.S., Thornhill, N.F y Shah, S.L.

2006 Automatic detection and quantification of control valve stiction.

En: Control Engineering Practice, Número 14(12), pp. 1395–1412.

[17] UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA,

Vibraciones en máquinas. Mantenimiento predictivo. Material de enseñanza. Navarra.

Consulta: 12 de Septiembre 2013.

http://www.imac.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/asignaturas/emyv/pdfdoc/vib/vib_predictivo.pdf

[18] Azimaldi

Introducción al análisis de vibraciones

Consulta: 20 de Septiembre de 2013

<http://support.azimadli.com/vibman-spanish/elconceptodefase.html>

[19] Pedrollo

2010 Catalogo de Bombas

[20] Texas Instruments

2013 Datasheet LM158-N, LM258-N, LM2904-N, LM358-N

Consulta: 10 de Octubre de 2013

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf>

[21] Vishay

2002 Datasheet LCD-016M002B

Consulta: 10 de Octubre de 2013

<http://www.dfrobot.com/image/data/FIT0127/datasheet.pdf>

[22] Texas instruments

2013 Datasheet LM340-N/LM78XX Series 3-Terminal Positive Regulators

Consulta: 10 de Octubre de 2013

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm340-n.pdf>

[23] Texas instruments

2013 Datasheet LM79XX Series 3-Terminal Negative Regulators

Consulta: 10 de Octubre de 2013

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7905.pdf>

[24] Castelli Marcelo, Juan Pablo Fossatti and Jose Ignacio Terra

(2012). Fault Diagnosis of Induction Motors Based on FFT, Fourier Transform - Signal Processing

Consulta: 10 de Octubre de 2013

<http://www.intechopen.com/books/fourier-transform-signal-processing/fault-diagnosis-of-induction-motors-based-on-fft>

