

PROTECCIÓN POR TEMPERATURA DE LOS DEVANADOS DE MOTORES DE BOMBAS SUMERGIBLES

PROTECTION TEMPERATURE PROTECTION OF SUBMERSIBLE PUMP MOTOR WINDINGS

Oscar Manuel Cortés¹, Mario Salvador Esparza-González², Christian Geovanni Hernández-Murillo³

<https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v7i2.312>

¹Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes, departamento de ingeniería eléctrica y electrónica. R24153076@aguascalientes.tecnm.mx, 449 199 4934, Av. Adolfo López Mateos #1801 Ote. Fracc. Bona Gens, C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. <https://orcid.org/0009-0008-8748-842X>.

²Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes, departamento de ingeniería eléctrica y electrónica. mario.eg@aguascalientes.tecnm.mx, 449 256 0982, Av. Adolfo López Mateos #1801 Ote. Fracc. Bona Gens, C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. <https://orcid.org/0009-0000-8837-5525>.

³Doctorado en Ciencias en Ingeniería. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes, departamento de ingeniería eléctrica y electrónica. christian.hm@aguascalientes.tecnm.mx, 449 254 77 59, Av. Adolfo López Mateos #1801 Ote. Fracc. Bona Gens, C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. <https://orcid.org/0009-0003-4406-245X>.

Resumen -- En este trabajo de investigación se presenta una protección que se coloca en los devanados del motor de bomba sumergible para detectar su temperatura, cuando ésta se incrementa a un valor superior a los 75 °C, genera una señal con una frecuencia de 200kHz la cual es enviada a través de los cables de alimentación hasta un receptor en el arrancador del motor.

El diseño incluye la fuente de alimentación, un transmisor por portadora de corriente basado en un Oscilador Controlado por Voltaje (VCO), para detectar la señal se utiliza un Lazo de Amarre de Fase (PLL) como receptor, estos circuitos están aislados en la línea de alimentación mediante un par de capacitores de alto voltaje y un transformador de frecuencia intermedia (TFI).

La protección se probó separando el transmisor y el receptor a una distancia de 13.5 m, el comparador de temperatura maneja un rango de histéresis de los 70.47 a los 75 °C.

Palabras Clave: Protección, devanados, transmisor, receptor, portadora de corriente.

Abstract: In this investigation work a protection is presented that is placed in those reeled of the motor of submersible pump for detect its temperature and when it detects that it is increased to a superior value to the 75°C, it generates a sing with a frequency of 200 kHz which is a correspondent through the feeding cables until a receiver in the starter of the motor.

The design includes the feeding source, a transmitter for carrier current based on a VCO (Voltage Controlled Oscillator), to detect the sing we use a PLL (Phase-Locked Loop) as receiver, these circuits are isolated of the feeding line by means of a couple of capacitors of high voltage and a transformer of intermediate frequency (TFI).

The system was proven separating the transmitter and the receiver a distance of 13.5 m, the comparative of temperature manages a hysteresis range from the 70.47 to the 75 °C.

Key words: Protection, reeled, transmitter, receiver, carrier current.

INTRODUCCIÓN

Los motores de inducción trifásicos (MIT) son ampliamente utilizados en la industria, son el caballo de batalla del sector industrial, debido a su casi nulo mantenimiento, además de que existen en un amplio rango de tamaños y capacidades [1].

Un caso especial son los MIT para bombas sumergibles (MBS) a estos [2] los considera vitales y menciona que se pueden utilizar en diversas aplicaciones, como proyectos de conservación de agua a gran escala [3], suministro de agua urbana [4], sistemas de drenaje [5], drenaje de minas [6], socorro de emergencia en casos de desastre [7] y otras aplicaciones. Es por ello que existe una preocupación por analizar su comportamiento y mantenerlos en óptimas condiciones para su correcta operación. Son dos las principales diferencias de este tipo de MBS de los de tipo seco, la principal es que los devanados de los MIT para bombas sumergibles están en contacto permanente con el líquido bombeado, por esta misma razón, la otra diferencia es que están embobinados con alambre magneto forrado (AMP) con un aislante termoplástico, mientras que los MIT tipo seco utilizan alambre magneto barnizado.

Las fallas que se presentan en los MBS pueden ser mecánicas y eléctricas. Las fallas mecánicas tienen la particularidad de que su evolución es relativamente lenta, por el contrario, las fallas eléctricas generalmente presentan una evolución rápida hasta convertirse en una falla catastrófica en poco tiempo [8], por lo tanto, su

detección suele ser muy difícil y se hace fundamental su detección temprana [9].

Específicamente las fallas en los devanados del estator son una de las principales fallas en los MBS, en el trabajo realizado por [10] se revisan y discuten las fallas o mal funcionamiento de las bombas eléctricas sumergibles (ESP). Por lo tanto, revisó toda la información importante relacionada con esta máquina, como la construcción y el funcionamiento. Se centró específicamente en las fallas y los detalles de las mismas. Para ello, define la falla como el cambio en cualquier componente de la máquina que impide su correcto funcionamiento. También se puede definir como la indisponibilidad de un elemento para realizar una acción prevista. La revisión llegó al resultado de que la falla del motor contribuye con el 40% de todas las fallas totales del sistema. En el contexto de la falla del motor, las fallas del devanado del estator y de los cojinetes son responsables de alrededor del 35 al 40 % de las fallas totales del motor cada una. Es notable que muchas fallas del motor están relacionadas con fallas mecánicas que resultan en un aumento de la temperatura del motor, provocando con ello una ruptura del aislamiento y esto a su vez, un corto circuito.

En [11] se define el aislante eléctrico como un medio o un material que, cuando está colocado entre conductores a diferentes potenciales, permite que fluya por él sólo una pequeña o despreciable corriente en fase con el voltaje aplicado, el intervalo de resistividades de sustancias que se pueden considerar aislantes va desde más de $10^{20} \Omega\text{cm}$ hasta cerca de $10^6 \Omega\text{cm}$, dependiendo de la aplicación y del esfuerzo de voltaje, así mismo, define la resistencia o rigidez dieléctrica de un aislamiento, como el voltaje máximo por unidad de grosor, que puede soportar un dieléctrico en un campo uniforme antes de romperse eléctricamente. La resistencia dieléctrica, por lo general, se mide en kilovolt por milímetro o por pulgada.

La identificación adecuada de fallas requiere mucho tiempo y requiere expertos humanos altamente capacitados, aunado a que después de la implementación, la monitorización se restringe a la adquisición de algunos parámetros básicos, como el consumo de corriente. Este escenario enfatiza la necesidad de diagnosticar las fallas incluso antes de comprar el equipo, en [12] se presenta una solución de inteligencia artificial para diagnosticar fallas antes de la adquisición de sistemas sumergibles de motobombas de petróleo.

Para validar su propuesta y seleccionar el mejor clasificador realizaron un estudio comparativo utilizando miles de entradas de datos reales adquiridos en pruebas realizadas antes de la adquisición de motobombas sumergibles, los resultados mostraron que el rendimiento de los clasificadores es suficiente para facilitar el trabajo realizado por los humanos y, en consecuencia, reducir el

tiempo empleado en el proceso de diagnóstico de fallas de la bomba. Concluyeron que, aunque el sistema se ha evaluado con datos reales y escenarios de prueba reales, todavía es necesario investigar el rendimiento de los clasificadores cuando se consideran conjuntos de datos de sensores en lugar de datos de sensores individuales.

Mediante la investigación de numerosas motobombas sumergibles de varios fabricantes en varios pozos de Egipto [13] se encontró que la mayoría de las fallas del motor sumergible fueron causadas por el calentamiento excesivo del motor, el investigador ofrece una protección utilizando tres sensores termómetros colocados en el embobinado del motor y enviando una señal a un microcontrolador conectado en serie con el inversor. Los resultados de la simulación concuerdan razonablemente con los medidos experimentalmente para el motor utilizado en la investigación. Concluyeron que el esquema propuesto es simple y económico, a la vez que altamente eficiente, dando una alta precisión y sugieren que los productores de las empresas instalen sensores dentro de los motores sumergibles para protegerlos contra el sobrecalentamiento.

En otro trabajo presentado por [14] proponen un método de diagnóstico de fallas basado en la red de creencias profundas (DBN) que puede extraer automáticamente la información de las características de falla de los datos de funcionamiento originales de una unidad de bombeo alternativo sumergible (SRPU). La corriente de funcionamiento se utiliza como parámetro característico del estado de funcionamiento de la SRPU. El vector que se extrae de la corriente se utiliza como datos de entrada para el modelo de diagnóstico de fallos. El DBN se entrena primero con las corrientes originales, y luego se realiza la extracción gradual de la característica de falla a través de la estructura de múltiples capas. Sus resultados mostraron que el modelo puede extraer la característica de falla de las corrientes de funcionamiento del MBS e implementar el diagnóstico de falla de manera efectiva y concluyen que el efecto de extracción de características de este método es mejor que el método tradicional de extracción de características y el modelo tiene una mayor precisión de diagnóstico.

Existen en el mercado opciones para la monitorización de la temperatura de los devanados de los MBS, entre las más importantes se pueden mencionar la protección de Grunfos, MP 204 [15], Amacontrol de KSB [16] y Submonitor Connect de Franklin Electric [17], todas ellas requieren la invasión del motor al tener que instalarle en los devanados de un sensor de temperatura PT 100 y cablearlo hasta la superficie, el objetivo de este trabajo es proponer un sistema de protección basado en el límite de temperatura normal del motor transmitiendo la información mediante portadora de corriente desde el

MBS hasta su arrancador sin la necesidad de conductores adicionales a los de alimentación (CBS).

DESARROLLO Metodología.

La figura 1 muestra el diseño del sistema de protección por temperatura del MBS conformado por 5 etapas que se describen a continuación:

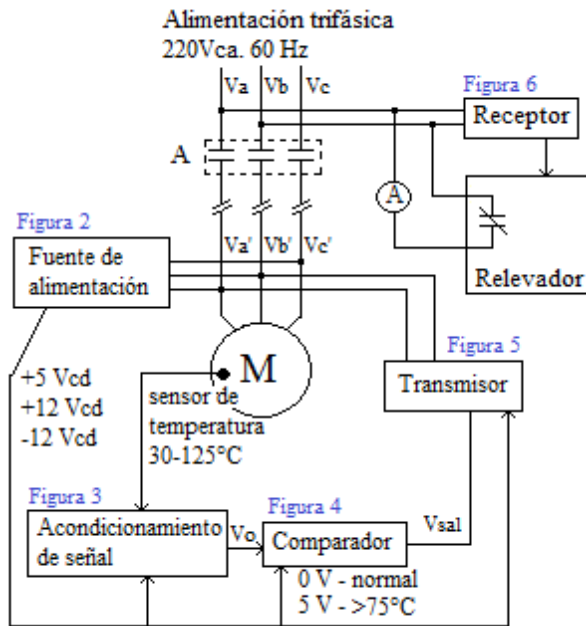


Figura 1. Diagrama de bloques.

El diseño consiste en desarrollar una fuente de alimentación a partir de la alimentación del motor para suministrar tensión de CD a los circuitos electrónicos. El sensor de temperatura se conecta a un acondicionador de señal para amplificar el voltaje suministrado por un termopar de forma que entre los 30 y 125°C de una tensión de salida de 0 a 5V, esta es comparada con un nivel de referencia equivalente a 75°C a los cuales se protege el MBS, si la temperatura excede el valor envía 5V al transmisor para que genere una frecuencia de 200kHz que es inyectada como portadora en los conductores de alimentación, al ser detectada por el receptor este activa el relevador que desconecta el contactor de potencia del motor e impide su conexión hasta que el motor se enfríe. En los siguientes apartados se describe cada módulo.

a) Fuente de alimentación (220VCA/+5, ±12VCD).

Los MBS se alimentan con voltajes trifásicos de 440 o 220 volts CA, 60 Hertz sin neutro, debido a que esta

protección no contará con ningún cable auxiliar se desarrolló una fuente con diodos Zener como reguladores de tensión, para alimentar los circuitos con voltajes de +5 y ±12 volts C.D.

La fuente alimentará a tres circuitos con voltajes y cargas diferentes, los cuales se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Carga a alimentar por voltaje.

Carga	Circuito integrado	Voltaje (volts)	Corriente máxima (mA)
Acondicionamiento	INA 114	± 12	3
Comparador	LM311	+5	7.5
Transmisor (VCO)	MC 4046B	+5	40

El circuito diseñado para la fuente es el mostrado en la figura 2.

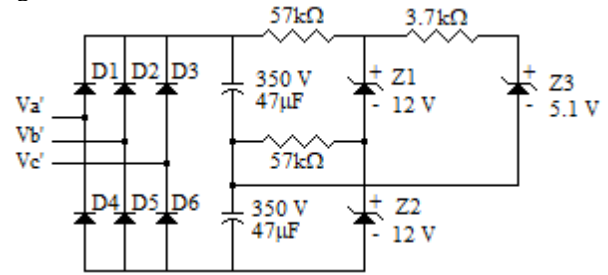


Figura 2. Fuente de alimentación.

El voltaje de ±12V CD se obtiene con los diodos Zener Z1 y Z2 cuyos parámetros son:

$$V_{Z1} = V_{Z2} = 12 \text{ V}, P_D = 0.5 \text{ W y } I_{Zmin} = 0.001 \text{ A}$$

Se obtiene el valor máximo de la fuente de alimentación, V_{Smax} , en función de la tensión pico de fase V_m con la ecuación 1.

$$V_{Smax} = 1.645 V_m \quad \text{Ec. (1)}$$

Substituyendo, $V_{Smax} = 1.645(220) = 361.9 \text{ V}$

Debido a que se necesitan voltajes tanto positivos como negativos se tiene una derivación central para aplicarle la mitad del voltaje a cada diodo Zener (VZ) y tomar el centro como el neutro del circuito, por lo tanto:

$$V_{SmaxZ} = 361.9/2 = 180.95 \text{ V}$$

La resistencia limitadora R_i se determina por la corriente de carga I_{ZMAX} , mediante la ecuación:

$$R_i = (V_{SmaxZ} - V_Z)/(1.1 I_{ZMAX}) \quad \text{Ec. (2)}$$

Al sustituir los valores en la ecuación 2 y ajustar al inmediato superior se define R_i en $57 \text{ k}\Omega$.

La potencia disipada (P) por la resistencia se obtiene de a partir de la corriente (I) mediante:

$$P = I^2 R_i \quad \text{Ec. (3)}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 3, se obtiene una $P=0.513 \text{ W}$ por lo que se requiere una resistencia de 1W .

Se verifica que no se exceda la potencia máxima en el diodo Zener (P_{DZI}) en función de Voltaje mínimo de la fuente (V_{Smin}) y la corriente mínima de carga (I_{Lmin}) mediante:

$$P_{DZI} = \frac{V_{Smin} - V_Z}{R_i - I_{Lmin}} V_Z \quad \text{Ec. (4)}$$

Sustituyendo los valores se obtiene $P_{DZI} = 0.0355\text{W}$. Por lo tanto, se selecciona un diodo Zener de $\frac{1}{2} \text{ watt}$.

Para la fuente de $+5\text{V CD}$ se ocupa, de acuerdo con la tabla 1, una corriente total de 47.5 mA , se obtienen los valores para el diodo Zener 3 (Z_3), teniendo los siguientes parámetros.

$$V_{Z3} = 5.1 \text{ V}, P_{D3} = \frac{1}{2} \text{ W y } I_{Zmin} = 0.001 \text{ A.}$$

Al sustituir los valores en la ecuación 2, se obtiene el valor de la resistencia limitadora para el diodo Zener 3, se considera el inmediato superior R_{iZ3} de $3.7 \text{ k}\Omega$.

Sustituyendo los valores en la ecuación 3, $P = (0.0475)^2 * 3,700$; se obtiene una $P=8.348 \text{ W}$ por lo que se requiere una resistencia de 10W .

La potencia del diodo Zener 3 se obtiene con la ecuación 4 quedando $P_{DZ3} = 0.2423 \text{ W}$.

b) Acondicionamiento de señal.

Las conexiones para el amplificador de instrumentación INA 114 se muestran en la figura 3.

La ganancia (G) que se puede obtener del INA 114 es de 1 a 10,000 y es controlada mediante una resistencia externa, R_G , dicha ganancia se calcula mediante la ecuación 5.

$$G = 1 + (50 \text{ k}\Omega) / R_G \quad \text{Ec. (5)}$$

Despejando R_G de la ecuación 5, tenemos la ecuación 6.

$$R_G = 50 \text{ k}\Omega / (G - 1) \quad \text{Ec. (6)}$$

Se obtuvieron los valores del termopar en milivolts, con la ayuda de un termómetro digital marca ENSA Electronics calibrado por CIATEQ y midiendo los valores de voltaje en cada lectura con un multímetro digital marca Fluke calibrado por LAPEM, se tomaron cuatro lecturas en un rango desde los 30 a los $125 \text{ }^\circ\text{C}$, las cuales se muestran en la tabla 2.

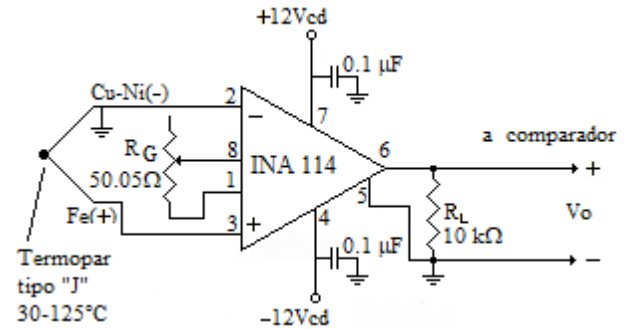


Figura 3. Circuito para el acondicionamiento de señal.

Tabla 2. Voltajes del termopar.

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Voltaje termopar (mV)
30	0
75	2.3
100	3.7
125	5

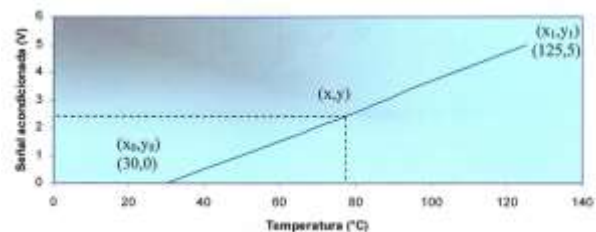
Se decidió tomar este rango ya que el voltaje de salida a los $125 \text{ }^\circ\text{C}$ es de 5 mV , por lo que se ocupa acondicionar la señal aumentándola mil veces para obtener un valor de salida (V_o) en el rango de 0 a 5V ; por lo tanto, $G = 1000$.

Con la ecuación 6 se obtiene $R_G = 50.05\Omega$; para dar el valor exacto se utiliza un potenciómetro de precisión.

La gráfica 1 muestra la respuesta del amplificador para una temperatura (T) de 0 a 125°C . Utilizando la ecuación de la recta la función de salida se define:

$$V_o = (5/95) (T - 30)$$

Para un valor de $T = 75 \text{ }^\circ\text{C}$, se tiene un valor de $V_o = 2.36 \text{ V}$, este valor de voltaje servirá para colocar el nivel de voltaje de referencia (V_{ref}) en el circuito comparador, V_o sea mayor a este valor el comparador dará una salida en alto para activar al transmisor.



Gráfica 1. Temperatura VS Voltaje de salida del INA 114.

c) Comparador.

Para el comparador se utilizó el circuito integrado LM 311, el cual compara una señal de voltaje en una entrada respecto a un voltaje de referencia en la otra entrada.

Para evitar problemas de ruido, se utiliza la retroalimentación positiva, se lleva a cabo tomando una fracción de voltaje de salida V_{sal} y aplicándola a la entrada positiva (+). En la figura 4, el voltaje de salida V_{sal} se divide entre R y n veces su valor. El voltaje de entrada, que proviene del acondicionamiento de señal se aplica a través de la resistencia R a la entrada (+), de modo que el circuito es no inversor.

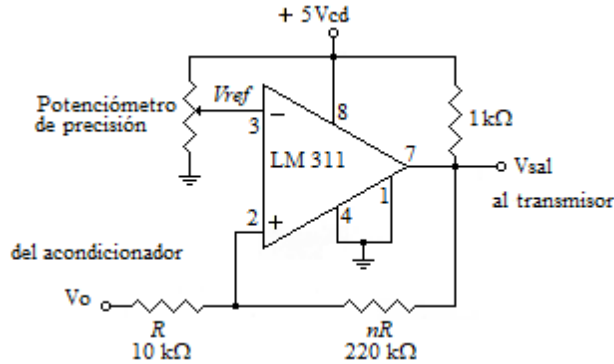


Figura 4. Circuito del comparador.

Siempre que un circuito cambia de un estado a un segundo estado con cierta señal y entonces regresa del segundo estado al primer estado con otra señal de entrada diferente, se dice que el circuito exhibe histéresis, por lo tanto, los voltajes de umbral superior (V_{UT}) e inferior (V_{LT}) pueden encontrarse por las siguientes:

$$V_{UT} = V_{ref} \left(1 + \frac{1}{n}\right) - \frac{-V_{sat}}{n} \quad \text{Ec. (7)}$$

$$V_{LT} = V_{ref} \left(1 + \frac{1}{n}\right) - \frac{+V_{sat}}{n} \quad \text{Ec. (8)}$$

V_{UT} se considera en 2.36 V que corresponde al límite de temperatura en 75°C. El comparador es alimentado en su terminal positiva con +5 volts ($+V_{sat}$) y en su terminal negativa por 0 volts ($-V_{sat}$), por conveniencia se define $n=22$ y $R=10 \text{ k}\Omega$ por tanto $nR= 220 \text{ k}\Omega$, se despeja V_{ref} de la ecuación 7 y se substituyen los valores:

$$V_{ref} = \frac{2.36}{\left(1 + \frac{1}{22}\right)} - 0 = 2.26 \text{ V.}$$

Teniendo el valor de V_{ref} y empleando la ecuación 8, se calcula el V_{LT} :

$$V_{LT} = 2.26 \left(1 + \frac{1}{22}\right) - \frac{5}{22} = 2.13 \text{ V}$$

Utilizando la ecuación 7, con $V_O = V_{LT} = 2.13 \text{ V}$, se despeja T , para conocer a que valor de temperatura en °C representa dicho valor, con estos valores se tiene:

$$T = \frac{95(2.13)}{5} + 30 = 70.47^\circ\text{C.}$$

Con este rango de histéresis la protección garantiza que después de activada la protección el motor no operará si la temperatura no baja a nivel por debajo del valor de V_{LT} , es decir, 70.47 °C, que es la temperatura apropiada para que el motor trabaje sin riesgo.

d) Transmisor por portadora de corriente.

Este transmisor por portadora de corriente consta de dos partes un oscilador controlado por voltaje (VCO) y un transmisor. El VCO produce una señal de salida, generalmente una onda cuadrada, cuya frecuencia es proporcional al valor de un voltaje de CD aplicado en su entrada de control.

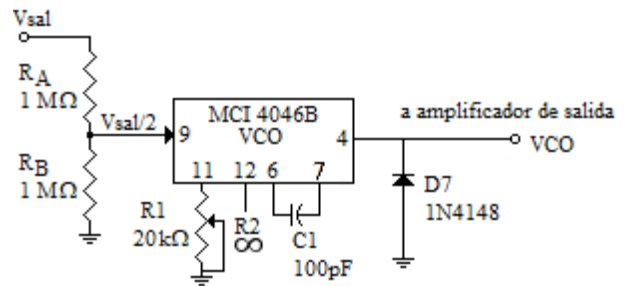


Figura 5. Circuito transmisor.

La señal del comparador ingresa al VCO del lazo de amarre de fase (Phase-Locked Loop, PLL) del circuito integrado MC1 4046B, el cual se encarga de modular la señal entrante sobre una portadora de 200 kHz, la frecuencia mínima (f_{min}) se podrá determinar por la ecuación 9 y la frecuencia máxima (f_{max}) se calcula con la ecuación 10, para esta aplicación no se requiere desplazar la frecuencia central por lo que f_{min} es cero Hertz, de la ecuación 9, R_2 es ∞ ; el pin 12 queda desconectado.

$$f_{min} = \frac{1}{R_2(c1+32pF)} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$f_{max} = \frac{1}{R_1(c1+32pF)} \quad \text{Ec. (10)}$$

Se considera una $f_{max} = 400 \text{ kHz}$, se define el capacitor $C1=100 \text{ pF}$ y de la ecuación 10 se calcula el valor de $R1 = 18,939.39 \Omega$; se selecciona en $20 \text{ k}\Omega$.

El VCO opera a una frecuencia específica, llamada frecuencia central (F_0); definida por la tensión de entrada proveniente del comparador. El divisor de tensión se ajusta con RA y RB, se definen en $1\text{ M}\Omega$. Cuando la señal del comparador está en alto (5V), en la entrada aplica $V_{sal}/2$ entonces la frecuencia central es:

$$F_0 = f_{max}/2 \quad \text{Ec. (11)}$$

Con $f_{max} = 400\text{ kHz}$ al sustituir el valor en la ecuación 11 se obtiene el valor de $F_0 = 200\text{kHz}$.

La salida VCO es de 5V; esta señal es amplificada por el transistor PN 2222 A, la ecuación de la malla del lado derecho mostrada en la figura 6 es:

$$I_C (R_{CE} + R4) + V_{CE} = 12 \quad \text{Ec. (12)}$$

Dónde I_C es la corriente en el colector, R_{CE} es la resistencia en el colector equivalente, $R4$ es la resistencia en el emisor y V_{CE} el Voltaje Colector-Emisor.

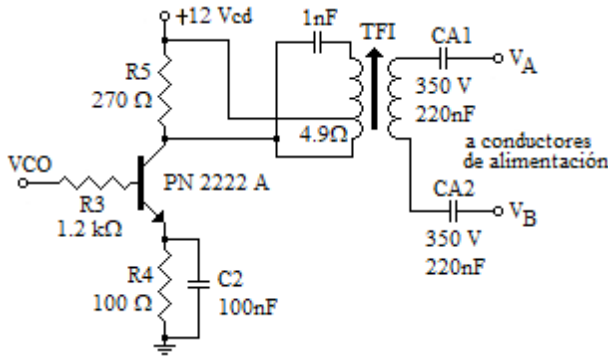


Figura 6. Amplificación de la señal de salida del VCO.

La resistencia en el colector equivalente (R_{CE}) se calcula a partir de la resistencia $R5$ y la resistencia del transformador de frecuencia intermedia (TFI) $RT2$ mediante:

$$R_{CE} = \frac{R5 * RT2}{R5 + RT2} \quad \text{Ec. (13)}$$

Para la malla del lado izquierdo, de la figura 6, la ecuación se define por:

$$I_B R3 + V_{BE(sat)} = 5 \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde: I_B es la corriente de base, $R3$ la resistencia de la base y $V_{BE(sat)}$ el Voltaje base-emisor en saturación.

La corriente de base se define a partir de la ganancia del transistor (β) mediante:

$$I_B = I_C/\beta \quad \text{Ec. (15)}$$

Esta señal amplificada se coloca sobre el transformador TFI que opera hasta 455 kHz para inyectar a la red eléctrica. El TFI debe estar sincronizado a la frecuencia de portadora de 200 kHz. Los capacitores CA1 y CA2 que se muestran en la figura 6 son de alto voltaje y aíslan el transformador TFI de la red eléctrica.

El transistor PN2222A presenta los siguientes parámetros en su ficha técnica, $V_{CE(sat)} = 1\text{ V}$, $V_{BE(sat)} = 2\text{ V}$ y $\beta = 40$.

Se define $R5 = 270\Omega$ y $R4 = 100\Omega$; utilizando un multímetro digital se obtiene el valor de resistencia del TFI $RT2 = 4.9\Omega$. Se substituyen los valores en la ecuación 13 para obtener $R_{CE} = 4.81\Omega$.

Con la ecuación 12, se calcula la corriente de colector $I_C = 0.1049\text{ A}$. Con la ecuación 15 se obtiene el valor de I_B .

$$I_B = 0.1049/40 = 2.623 \times 10^{-3}\text{ A}$$

utilizando la ecuación 14 se despeja $R3$ para obtener su valor; $R3 = 1,143\ \Omega$, se establece en el valor comercial de $1.2\text{ k}\Omega$. El circuito transmisor se muestra en la figura 6 con los valores de diseño.

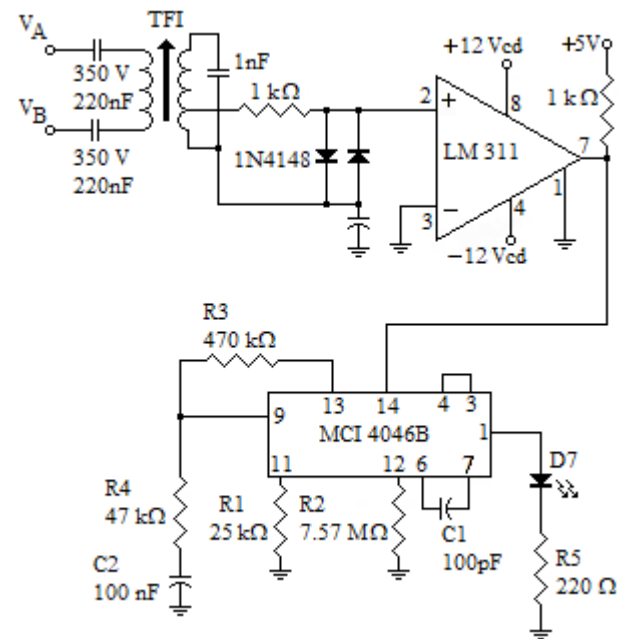


Figura 7. Circuito receptor.

e) Receptor por portadora de corriente.

La señal proveniente de la red eléctrica deberá ser aislada por dos capacitores de alta tensión e insertada a un TFI de las mismas características que el transmisor, tal como se muestra en la figura 7.

Se amplifica la señal que proporciona el TFI, mediante un comparador de voltaje el LM311, en su salida se coloca una resistencia en pull up de 1 kΩ y se obtiene un voltaje de 5 Vpp con una frecuencia de 200 kHz.

El TFI debe estar sincronizado a 200 kHz que es la frecuencia de portadora empleada para la transmisión de la señal, la cual puede ser recuperada a distancias mayores de 10 m, mediante un receptor tal como el mostrado en la figura 7, basado en un PLL, el cual es un sistema de control de frecuencia constituido por un comparador o detector de fase, un filtro pasa bajos y un VCO. Esta etapa se desarrolla con el circuito integrado 4046B que incluye los tres elementos.

Se utiliza el comparador PC2, al cual se le conoce como detector de fase de banda ancha ya que tiene un rango de captura mucho más amplio y acepta señales de entrada asimétricas. La señal de entrada se aplica en el pin 14 (SIGNAL IN) y la señal de comparación proviene del VCO (pin 4), se aplica al pin 3 (COMP IN).

Este comparador entrega en su salida (pin 13) un nivel alto cuando la frecuencia de entrada es más alta que la del VCO y un nivel bajo en el caso contrario. Si las 2 señales tienen la misma frecuencia y fase, la salida del control pin 1 (PHASE PULSES), se hace alta, esta información se utiliza para indicar a los circuitos externos que el PLL está enganchado; en este caso activa el relevador mostrado en la figura 1 para desenergizar el motor.

Las resistencias R3, R4 y C2 forman un filtro pasabajos, este determina la velocidad con la cual el sistema puede seguir los cambios en la frecuencia de entrada, influye en el rango de captura y evita que la operación normal del PLL pueda ser afectada por picos de ruido.

Para el receptor sí se incrementó el nivel de offset a 10 kHz. Se define C1 en 100 pF y empleando la ecuación 9 calcula R2 obteniendo un valor de 7.57 MΩ. Con esto se evita que se enganche con la frecuencia de la línea de alimentación 60 Hz.

La frecuencia máxima (f_{max}) se estableció con un valor de 300 kHz, con la ecuación 10, se obtiene el valor de R1 en 27 kΩ.

El rango de enganche del sistema PLL (ΔF_L), define la banda de frecuencia dentro de la cual el PLL se puede mantener enganchado con una señal de entrada previamente capturada. Se evalúa mediante:

$$\Delta F_L = \pm (f_{max} - f_{min})/2 \quad \text{Ec. (18)}$$

El rango de captura del mismo sistema (ΔF_C), define la banda de frecuencias dentro de la cual el PLL puede rastrear y capturar una señal de entrada hasta engancharse

con ella. Como se utilizó el comparador PC2 (pin 13), el rango de captura será igual al rango de enganche, es decir:

$$\Delta F_C = \Delta F_L \quad \text{Ec. (19)}$$

Por tanto, el PLL podrá capturar y mantenerse enganchado con cualquier frecuencia comprendida dentro del rango de operación del VCO.

La protección se calibra y ajusta para realizar pruebas a una distancia de 13.5m.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La figura 8, muestra la señal portadora, la cual se obtiene al aumentar la temperatura a un valor superior a los 75 °C, logrando tener una señal de 5 Vpp a una frecuencia de 200 kHz.

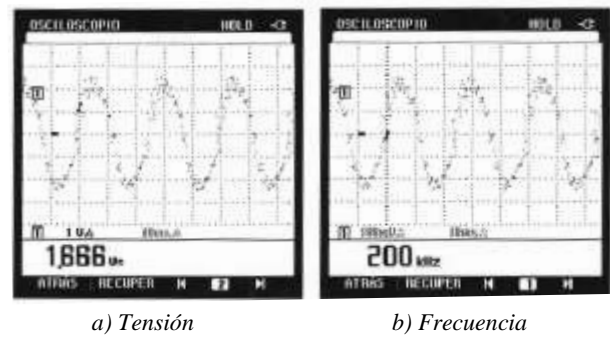


Figura 8. Señal del transmisor.

En la figura 9 se puede observar cómo esta señal portadora de 200 kHz se monta sobre la señal de alimentación de 60 Hertz, haciéndola ver un poco más ancha e incrementando su amplitud.

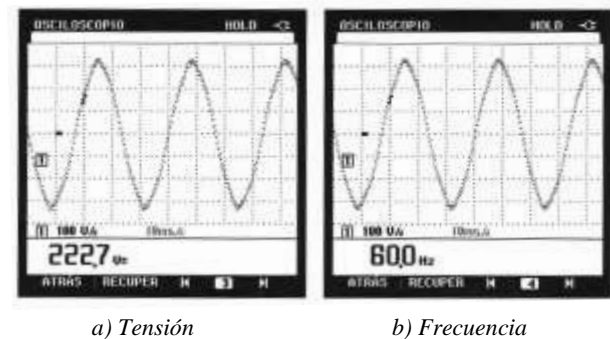


Figura 9. Señal de alimentación en Va'-Vb' con portadora,

En la figura 10, se puede observar un acercamiento a la señal de alimentación con la portadora alrededor de los 200 kHz.

El circuito receptor fue colocado en el extremo opuesto del Cable Bomba Sumergible de 13.5m, logrando filtrar la señal portadora de 200 kHz generada por el transmisor, en la figura 11 se puede observar la señal a la salida de

TFI, con el inconveniente de su pequeña amplitud para el disparo de un dispositivo; alrededor de 1 Vpp.

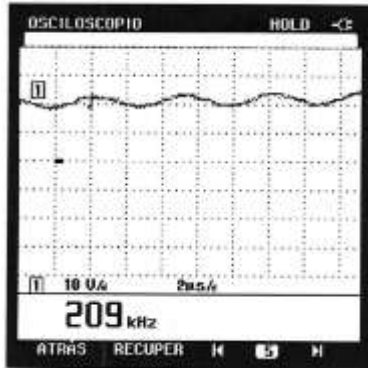
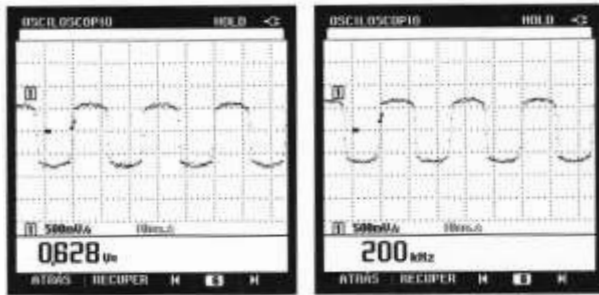


Figura 10. Señal de alimentación Va'-Vb' con portadora ampliada.

a 70 °C, la salida se puso en bajo, 0 V, como se observa en la figura 14.

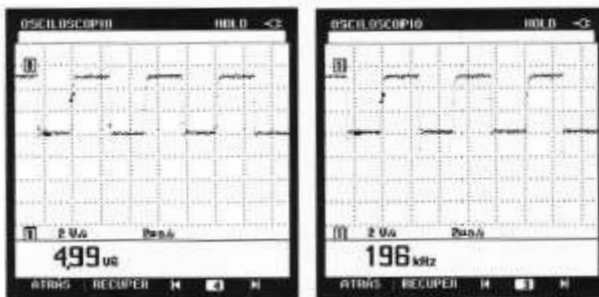


Figura 13. Salida en alto del pin 1, voltaje del receptor enganchado.



a) Tensión b) Frecuencia
Figura 11. Señal de salida en TFI del receptor

Con el comparador LM311 se convierte la señal a digital de rango 0 a 5 V; la respuesta se observa en figura 12:



a) Tensión b) Frecuencia
Figura 12. Señal a la salida del LM311.

Esta señal es insertada al PLL en su pin 14 (SIGNAL IN), para compararla con la señal del VCO y como cae dentro del rango de enganche de 10 a 300 kHz el sistema se logró enganchar, tal como se muestra en la figura 13.

Por último, se dejó enfriar el motor, llegando a la temperatura ambiente, es decir, con la temperatura menor



Figura 14. Salida en bajo, sin voltaje en el receptor.

A pesar de que en [13] concluyeron que el sistema propuesto es simple y económico, además de confiable, aún queda el inconveniente de tener que cablear los tres sensores desde el MBS hasta la superficie, algo que con esta propuesta se elimina al enviar la señal por portadora de corriente.

La protección diseñada a diferencia de [14] no necesita información previa sobre las fallas para el aprendizaje de la red neuronal, solo se requiere seleccionar la máxima temperatura de operación del MBS para que la protección actúe.

La principal ventaja de esta propuesta en comparación de [15], [16] y [17] es su universalidad ya que se puede colocar a cualquier tipo de MBS, de cualquier marca y de cualquier capacidad en cualquier taller de reparación de bombas sumergibles por lo que no está limitada a ciertas marcas o capacidades de MBS.

CONCLUSIONES

Se puede concluir que la protección por temperatura a través de portadora emplea los conductores de alimentación para comunicación entre el sensor y el actuador. La señal de alerta por alta temperatura se genera

a los 75°C. Al bajar la temperatura a un valor de 70°C la salida se desactiva permitiendo nuevamente la operación de la bomba. Se logra operar con histéresis, asegurando que el motor pueda operar sin riesgo cuando se ha enfriado. El sistema propuesto protege al motor evitando que supere la temperatura normal de operación sin necesidad de cableado adicional al de alimentación. Esta alerta indica que se requiere un mantenimiento, al hacerse de manera oportuna se disminuye el costo de la reparación.

Se tiene como investigación a futuro trabajar en la evaluación de la degradación del aislamiento a partir de los incrementos de temperatura registrados en la bomba para predecir la falla antes de que ocurra. Otro campo de investigación consiste en desarrollar un algoritmo que permita la autocalibración de la transmisión de información por portadora en función de la profundidad de la bomba sumergible.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Instituto Tecnológico de Aguascalientes por las facilidades para la utilización de material y uso del laboratorio de Ingeniería Eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Villalobos-Piña, F. J., & Álvarez-Salas, R. (2015). Algoritmo robusto para el diagnóstico de fallas eléctricas en el motor de inducción trifásico basado en herramientas espectrales y ondeletas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 12(3), 292–303. doi:<https://doi.org/10.1016/j.riai.2015.04.003>
- [2] Barrios Castellanos, M., Serpa, A. L., Biazussi, J. L., Monte Verde, W., & N.S., D. A. (January de 2020). Fault identification using a chain of decision trees in an electrical submersible pump operating in a liquid-gas flow. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 184(106490). doi:<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106490>
- [3] Tahmasebi, P., Kamrava, S., Bai, T., & Sahimi, M. (August de 2020). Machine learning in geo- and environmental sciences: From small to large scale. (ELSEVIER, Ed.) *Advances in Water Resources*, Volume 142(103619). doi:<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103619>
- [4] Wei, Q., Sun, X., & Y., S. A. (12 de September de 2019). Numerical study on the impact of the coupling of diffuser parameters on the performance of submersible pumps used in town water distribution systems. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Volume 41(article number 408). doi:<https://doi.org/10.1007/s40430-019-1911-8>
- [5] Peng, Y., Ye, C., Sun, F., Wang, X., Zhu, P., Zhu, Q., . . . Wang, W. (October de 2018). Drainage gas recovery technology for high-sulfur gas wells by a canned ESP system. *Natural Gas Industry B*, Volume 5(Issue 5), Pages 452-458. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ngib.2018.02.002>
- [6] Pezzuto, A., & Sarver, E. (October de 2020). A lab study of mineral scale buildup on line and traditional PE water pipes for acid mine drainage. *Journal of Sustainable Mining*, Volume 19(Issue 1), 31-45. doi:<http://dx.doi.org/10.46873/2300-3960.1004>
- [7] Kox, T., Lüder, C., & Gerhold, L. (12 de March de 2018). Anticipation and Response: Emergency Services in Severe Weather Situations in Germany. *International Journal of Disaster Risk Science*, Volume 9, pages 116–128. doi:<https://doi.org/10.1007/s13753-018-0163-z>
- [8] Bellini, A., Filippetti, F., Tassoni, C., & Capolino, G.-A. (December de 2008). Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 55(12), 4109 - 4126. doi:<https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2007527>
- [9] Garcia-Guevara, F. M., Villalobos-Piña, F. J., Alvarez-Salas, R., Cabal-Yepez, E., & Gonzalez-García, M. A. (2016). Stator Fault Detection in Induction Motors by Autoregressive Modeling. *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2016(Article ID 3409756), 7 pages. doi:<http://dx.doi.org/10.1155/2016/3409756>
- [10] Al-Hashmi, S. A. (March de 2021). Condition monitoring of Electrical Submersible Pumps (Faults review). *Journal of Pure & Applied Sciences*, Vol. 20(No. 1), 71-74. doi:<http://dx.doi.org/10.51984/jopas.v20i1.1070>
- [11] Fink, D. G., & Wayne Beaty, H. (1996). *Manual de Ingeniería Eléctrica (Vol. TOMO I)*. (J. H. Romo Muñoz, R. García Díaz, J. H. Pérez Castellanos, J. De la Cera Alonso, J. R. Salas Contreras, & E. Ramírez Grycuk, Trads.) MCGRAW-HILL. doi:ISBN 970-10-0872-3
- [12] Oliveira-Santos, T., Rauber, T., Varejão, F., Martinuzzo, L., Oliveira, W., Pellegrini Ribeiro, M., & Rodrigues, A. (06-08 de November de 2016). Submersible Motor Pump Fault Diagnosis System: A Comparative Study of Classification Methods. (IEEE, Ed.) *2016 IEEE 28th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, 415 - 422. doi:<https://doi.org/10.1109/ICTAI.2016.0070>
- [13] Sanad, K. A., El-Samahy, A. A., & Mourad, D. (1 de May de 2022). Performance Analysis and Protection of Submersible Motor for Unbalance Condition in Dewatering. (N. S. Cor., Ed.) *International Journal of Thin Films Science and Technology*, 11(No. 2), 191-199. doi:<http://dx.doi.org/10.18576/ijfst/110206>
- [14] Yu, D., & Zhang, H. (15 de June de 2020). Fault Diagnosis Method for Submersible Reciprocating Pumping Unit Based on Deep Belief Network. (IEEE, Ed.) *IEEE Access*, Volume: 8, 109940 - 109948. doi:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002376>
- [15] Grundfos México. (s.f.). Grundfos. Recuperado el 15 de Abril de 2024, de <https://product->

selection.grundfos.com/mx/products/mp/mp-204/mp-204-96079927?pumpssystemid=2361219131&tab=variant-specifications

[16] KSB de México, S.A. de C.V. (s.f.). KSB. Recuperado el 15 de Abril de 2024, de <https://www.ksb.com/es-es/lc/productos/automatizacion-de-bomba/amacontrol/A75B>

[17] Franklin Electric Latinoamerica. (s.f.). franklinagua.com. Recuperado el 15 de Abril de 2024, de <https://franklinagua.com/productos/arrancadores,-controles-y-protecciones/componentes-para-controles-y-protecciones/protecciones-trif%C3%A1sicas-submonitor-connect.aspx>

ROLES DE CONTRIBUCIÓN

Rol	Autor (es)
Conceptualización y administración del proyecto.	Oscar Manuel Cortés
Curación de datos y supervisión	Mario Salvador Esparza González
Metodología	Christian Geovanni Hernández Murillo



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.