

DISEÑO ELECTRONICO DE RELES DE PROTECCION PARA MINICENTRALES HIDROELECTRICAS

Ing. Avid Román González
a.roman@ieee.org

RESUMEN

Sabiendo que en la región del Cusco existen muchas zonas en las cuales la falta de energía eléctrica disminuye el nivel de vida de los pobladores y teniendo en cuenta que la geografía del lugar, es necesario realizar estudios de instalación de minicentrales hidroeléctricas, para lo cual es de mucha importancia la parte de protección de las mismas. En la actualidad existen muchas minicentrales, microcentrales y hasta nanocentrales hidroeléctricas que no cuentan con un sistema protección correctamente instalados.

Por ello es necesario el diseño de un sistema protección, para su posterior implementación, para que de esta manera se pueda proteger tanto al generador como a los usuarios de la minicentral.

*El primer objetivo es **Diseñar el sistema de protección para minicentrales hidroeléctricas, mediante relés de protección.***

*El segundo objetivo es **Diseñar el relé de frecuencia, como parte del sistema de protección de la minicentral hidroeléctrica.***

*El tercer objetivo es **Diseñar un rele de máxima y tensión que dispare cuando la tensión fijada sea superada.***

*El cuarto objetivo es **Diseñar un relé puesta en paralelo el cual pueda conectar y desconectar la minicentral del sistema interconectado nacional teniendo en cuenta los parámetros de tensión, frecuencia y fase.***

ABSTRACT

L Knowing that in the region of the Cusco many areas exist in which the electric power lack diminishes the level of the residents' life and keeping in mind that the geography of the place, is necessary to carry out studies of installation of hydroelectric minicentrales, for that which is of a lot of importance the part of protection of the same ones. At the present time many minicentrales exists, microcentrales and until hydroelectric nanocentrales that don't have a correctly installed system protection.

For it is necessary the design of a system protection, for their later implementation, so that this way you can protect as much to the generator as to the users of the minicentral.

*The first objective is to **Design the protection system for hydroelectric minicentrales, by means of protection relays.***

*The second objective is to **Design the relay of frequency, like part of the system of protection of the hydroelectric minicentral.***

*The third objective is to **Design the relay of tension maxim, that it shoots when the fixed tension is overcome.***

*The fourth objective is to **Design the relay in parallel. which can connect and to disconnect the minicentral of the national interconnected system keeping in mind the parameters of tension, frequency and phase.***

1. INTRODUCCION

Los sistemas de potencia son designados para generar potencia eléctrica de manera de satisfacer la demanda de los usuarios y previendo demandas futuras.

Para asegurar el máximo retorno de las grandes inversiones de los equipos electromecánicos utilizados en los sistemas de potencia y para mantener al usuario satisfecho con un servicio confiable, el total de los equipos deberán ser mantenidos en perfecto estado de operación. Esto se puede conseguir de dos formas.

La primera manera es por diseño y mantenimiento de cada componente de forma de prevenir fallas que podrían destruir los componentes utilizados.

La segunda manera es controlar las fallas para minimizar los efectos destructivos que pudieran ocurrir. En este punto es donde los relés de protección entran en un sistema de potencia. El relé de protección es el dispositivo que opera instantáneamente para desconectar la parte fallada protegiendo al sistema de fallas permanentes que podrían ocasionar grandes daños al sistema y así minimizar las interrupciones del servicio.

En un sistema de fuerza, los equipos más importantes son los generadores y los transformadores. En estos aparatos las fallas ocurren con menor frecuencia que en las líneas, pero la reparación de los daños que ocasionan requiere mucho más tiempo y dinero que lo que se necesita para reparar los daños debido a fallas en las líneas. En las líneas es posible restablecer rápidamente los disyuntores y eso ayuda a

aminorar la magnitud del daño. En cambio, cuando ocurre una falla en un generador o en un transformador, siempre se necesita la atención del personal de supervisión. Sin embargo, el rápido aislamiento de las fallas ayuda a minimizar el daño sufrido por los aparatos y reduce también la interrupción del servicio debido a la reducción de voltaje y a la inestabilidad.

Las principales componentes de un sistema de potencia son enormes maquinas rotatorias trifásicas, las que se deben proteger de una gran variedad de riesgos. El peligro básico en una maquina es el excesivo calentamiento, que a su vez puede causar daños estructurales y en el aislamiento. También son posibles fuerzas mecánicas y voltajes eléctricos de intensidades destructivas. Como los motores y generadores tienen similares necesidades de protección.

La presencia de subvoltaje, sobrevoltaje y Sobre velocidad, son los problemas que pueden producir mas daño.

2. DISEÑO DEL RELE DE MAXIMA Y MINIMA TENSION

Diagrama De Bloques

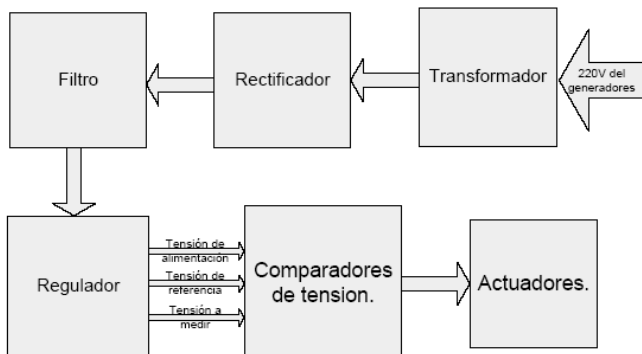


Fig.1 Diagrama de bloques

Diseño:

Para realizar los comparadores se ha utilizado amplificadores operacionales de propósito general 741, como estos amplificadores funcionan con tensiones de $\pm 15V$ o $\pm 12V$ se ha visto por conveniente utilizar para la parte de la fuente de alimentación:

- transformador de 220/12-0-12 V
- diodos rectificadores 1N4007
- condensadores para filtros de 1000 μ f a 25V
- reguladores de tensión 7812 y 7912

Las entradas de los comparadores son de dos tipos: una que será la tensión reflejada del generador y la otra que será una tensión de referencia con la cual se va a comparar.

Para la tensión de referencia utilizaremos la salida del regulador de 12V ya que, así la tensión de entrada al transformador (tensión del generador) se incremente por encima de 220V o baje mas de 220V, el regulador nos asegura que a su salida la tensión de 12V sea constante, que es lo que queremos con la tensión de referencia.

Para la entrada que va a reflejar la tensión del generador, cogemos la tensión que entra al regulador 7812, a la salida del filtro, como nuestro transformador es de 220/12-0-12 V obviamente si al transformador ingresa 220V, a la salida tendremos 220V, pero eso es en valores eficaces, si

quisiéramos saber el valor pico de tensión es cuestión de multiplicar por $\sqrt{2}$, ósea:

$$V_p = V_{rms} * \sqrt{2}$$

$$V_p = 12\sqrt{2}$$

$$V_p = 16.97V$$

Esta tensión después del rectificador y del filtro también será 16.97V en continua con pequeño rizado, dicha tensión será directamente proporcional a la tensión de entrada del transformador, así:

$$V_s = \frac{V_G * 12}{220} \sqrt{2}$$

$$V_s = \frac{3\sqrt{2}V_G}{55}$$

Donde:

V_s = tensión que refleja la entrada del transformador (tensión a comparar con la tensión de referencia).

V_G = tensión a la entrada del transformador (tensión del generador).

De esta manera para $V_G = 220V$ tenemos $V_s = 17.97V$.

$V_G = 220V$	$V_s = 17.97V$.
$V_G = 180V$	$V_s = 13.88V$.
$V_G = 190V$	$V_s = 14.66V$.
$V_G = 200V$	$V_s = 15.43V$.
$V_G = 210V$	$V_s = 16.2V$.
$V_G = 230V$	$V_s = 17.74V$.
$V_G = 240V$	$V_s = 18.51V$.

Estos voltajes son muy elevados para ser entradas de un comparador compuesto por un amplificador operacional 741 que es el que estoy utilizando, es así que se fijara que para una entrada de 220V se tenga una tensión a comparar de 9V, esto se logra utilizando un divisor de tensión. De la misma manera, para obtener una tensión de referencia se utilizara un divisor de tensión con potenciómetro incluido a partir de la salida del regulador, es así que el comparador quedaría de la siguiente manera:

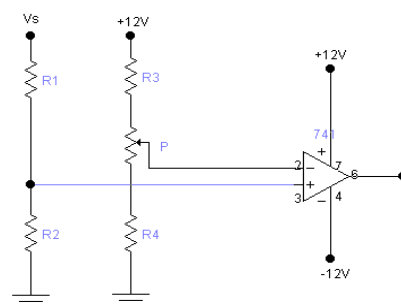


Fig.2 Comparador de máxima tensión.

Para calcular los valores de R_1 y R_2 se partirá de la premisa que:

$V_b = 9V$ cuando $V_G = 220V$, ósea $V_s = 16.97V$ de tal manera que si $V_{R2} = V_b = 9V$, entonces $V_{R1} = 7.97V$, por lo que las resistencias tendrán una relación igual a:

$$\frac{V_{R1}}{V_{R2}} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{7.97}{9}$$

De donde se obtiene valores iniciales de: $R_1 = 7.97K\Omega$ y $R_2 = 9K\Omega$.

Pero teniendo en cuenta que los valores comerciales de las resistencias son múltiplos y submúltiplos de:

10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30
33	36	39	42	47	51	56	62	68	75	82	91

Se aproxima R1 y R2 teniendo los siguientes resultados:

R1 = 16 KΩ y R2 = 18 KΩ

Para calcular los valores de R3 y R4 se debe tener en cuenta que el potenciómetro P sirve para variar la tensión de referencia desde un valor que represente 180V hasta otro que represente 240V tal como dice en las especificaciones del capítulo anterior para el relé de máxima y mínima tensión.

Teniendo en cuenta que para el divisor de tensión diseñado anteriormente 220V se representa por 9V, entonces 180V será 7.35V y 240V será 9.8V.

Por consiguiente para la tensión de referencia el potenciómetro debe tener la capacidad de variar entre la tensión mínima (7.35V) y la tensión máxima (9.8V), por lo que se tiene:

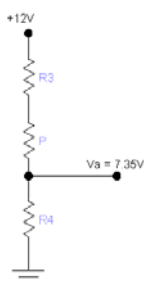


Fig.3 Tensión mínima.

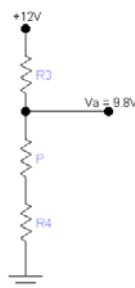


Fig.4 Tensión máxima.

Formulando ecuaciones para hallar los valores de R3, R4 y P se tiene:

$$V_{R3} + V_{R4} + V_P = 12 \dots \dots \dots (1)$$

$$V_P + V_{R4} = 9.8 \dots \dots \dots (2)$$

$$V_{R4} = 7.35 \dots \dots \dots (3)$$

Entonces reemplazando (3) en (2):

$$V_P + 7.35 = 9.8 \Rightarrow V_P = 2.45 \dots \dots \dots (4)$$

Reemplazando (3) y (4) en (1):

$$V_{R3} + 7.35 + 2.45 = 12 \Rightarrow V_{R3} = 2.2$$

Por consiguiente se tiene valores iniciales de:

$$R3=2.2 \text{ K}\Omega, R4=7.35 \text{ K}\Omega \text{ y } P=2.45 \text{ K}\Omega.$$

Teniendo en cuenta los valores comerciales de las resistencias se multiplica por 2 a todos los valores iniciales para mantenerlos en la misma relación y aproximando valores se tiene los siguientes resultados:

$$R3=4.3 \text{ K}\Omega, R4=15 \text{ K}\Omega \text{ y } P=5 \text{ K}\Omega.$$

Entonces el comparador de máxima tensión quedaría de la siguiente manera:

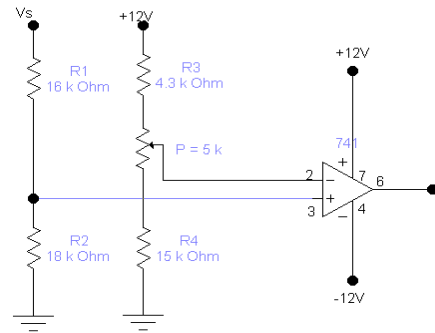


Fig.5 Comparador de máxima tensión con valores de resistencias especificados.

Para el comparador de mínima tensión los valores de las resistencias son las mismas, la diferencia radica en que la tensión de referencia se conecta a la entrada positiva (pin3 del 741) y el voltaje a medir se conecta a la entrada negativa (pin2 del 741), entonces el comparador de mínima tensión quedaría de la siguiente manera:

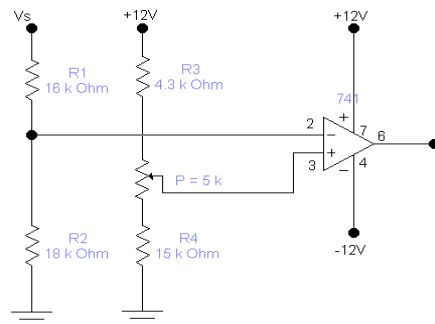


Fig.6 Comparador de mínima tensión.

Es así que el circuito completo para el relé de mínima y máxima tensión sería el siguiente:

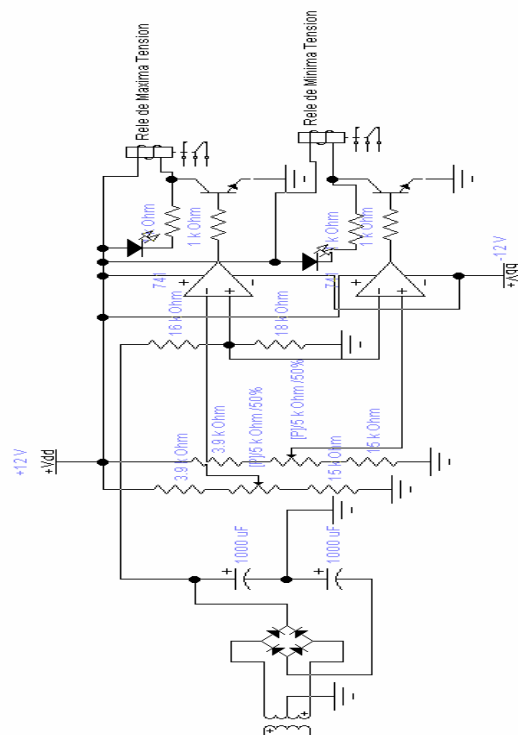


Fig.7 Relé de máxima y mínima tensión

A continuación se muestra algunas fotografías de la implementación del relé de máxima y mínima tensión



Fig.8 Implementación del Relé de Máxima y Mínima Tensión

3. DISEÑO DEL RELÉ DE FRECUENCIA

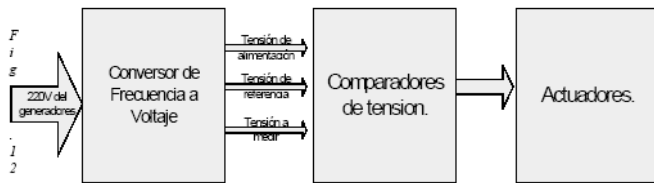


Fig. 9 Diagrama de Bloques para el Relé de Frecuencia

Para realizar el diseño del Relé de Frecuencia, se hará bloque por bloque.

Convertor de Frecuencia a Voltaje:

Para el convertor de Frecuencia a voltaje tenemos las siguientes etapas:

- a) Conversión seno/cuadrado-TTL: Como lo importante es medir la frecuencia de la señal del alternador, es necesario que el procesamiento analógico subsiguiente sea independiente de su amplitud, por lo que se convierte a una onda cuadrada de la misma frecuencia, primero bipolar (+Vsat y -Vsat) mediante un operacional como comparador, para luego, mediante un transistor y una fuente de 5 voltios convertirla a TTL.
- b) Una vez que se tiene una onda TTL de la misma frecuencia que la señal del alternador, se debe generar un pulso cuadrado de duración definida τ por cada período de la señal, utilizando un monoestable basado en el temporizador 555:

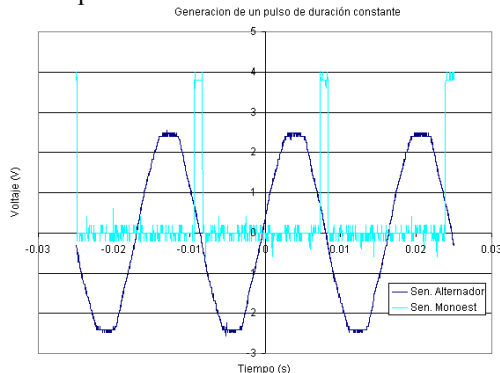


Fig. 10 Ondas del pulso generado para cada periodo de la señal del generador

- c) Filtro pasabajo de corriente: Esta última etapa convierte en voltaje el valor medio del pulso de corriente utilizando un operacional en configuración inversora con un condensador y una resistencia en el camino de realimentación, la señal de entrada y salida de esta última etapa se muestran a continuación:

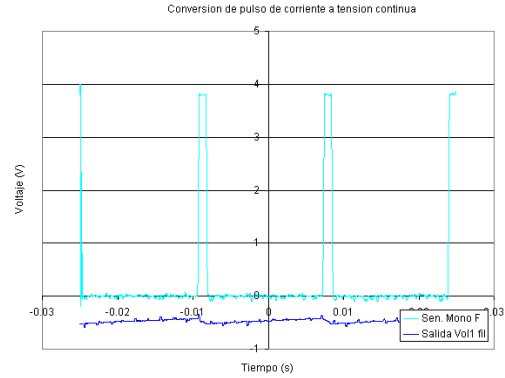


Fig..11 Señal del monoestable y el filtro

A la última etapa le añadimos un filtro pasabajo de tensión y un amplificador inversor adicional de ganancia cercana a 2 para tener un voltaje positivo proporcional a la frecuencia y aumentar el nivel de la señal, por si sea necesario para las etapas posteriores del controlador de frecuencia.

Fundamento Matemático Del Convertidor De Frecuencia A Voltaje CD:

Matemáticamente, el principio de funcionamiento del convertor de frecuencia a voltaje CD queda demostrado con la ecuación (8).

El conmutador controlado dejará pasar una corriente $I_p = 1.8mA$ hacia el integrador analógico cada vez que se presente un flanco de bajada en la señal del alternador

durante la constante de tiempo del monoestable t_{alta} . A la salida del operacional tendremos un voltaje continuo $V_1(t)$.

Para la demostración matemática el convertor de frecuencia aplicamos la ley de corriente en el punto de 2 del amplificador operacional de la figura 4-06, y tenemos la siguiente ecuación.

$$I_p(t) + I_1(t) + I_2(t) = 0$$

$$I_p(t) + \frac{V_1(t)}{R} + C \frac{dV_1(t)}{dt} = 0$$

Despejando la corriente tenemos:

$$C \frac{dV_1(t)}{dt} + \frac{V_1(t)}{R} = -I_p(t)$$

$$\frac{V_1(t)}{dt} + \frac{V_1(t)}{RC} = -\frac{I_p(t)}{C}$$

Aplicando la transformada de laplace a la ecuación queda de la siguiente forma.

$$sV_1(s) + \frac{1}{RC}V_1(s) = -\frac{1}{C} \mathcal{L}\{i(s)\} \dots \dots \dots (5)$$

Según la forma de señal de la corriente de saturación $I_p(t)$ en la entrada del pin 2 del amplificador operacional. Con esta función de corriente, demostraremos una ecuación de tensión de salida en el pin "1" del amplificador que es proporcional a la frecuencia de señal del alternador.

$\mathcal{F}\{i(t)\} = I_p [\{\mu(t) - \mu(t - t_{alta})\} + \{\mu(t - T) - \mu(t - (T + t_{alta})) + \dots\}]$
 La función $u(t)$ es el escalón unitario o función de Heaviside.

Despejado tenemos lo siguiente

$$\mathcal{F}\{i(t)\} = I_p \sum_n \{\mu(t - nT) - \mu(t - (nT + t_{alta}))\}$$

Resolviendo esta ecuación en función de transformada de laplace queda de la siguiente manera.

$$\mathcal{F}\{i(s)\} = \sum_{n=0}^{\infty} I_p \left(\frac{e^{-snT}}{s} - \frac{e^{-s(nT+t_{alta})}}{s} \right)$$

Remplazando en la ecuación de (5) tenemos que

$$V_1(s) = - \left[\frac{I_p}{s + \frac{1}{RC}} \right] \left(\frac{1}{C} \right) \underbrace{\left(\sum_{n=0}^{\infty} e^{-snT} \right)}_A \left(\frac{1}{s} \right) \left[\underbrace{1 - (e^{-st_{alta}})}_B \right]$$

Considerando como series exponenciales de $e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} \dots$ a los valores de A y B de la ecuación 4-08 tenemos lo siguiente:

$$A = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-snT} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-snT)^i}{i!}$$

$$A = 1 - snT + \frac{(-snT)^2}{2!} \dots$$

$$B = 1 - [e^{-st_{alta}}] = \left[1 - \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-st_{alta})^i}{i!} \right]$$

$$B = st_{alta} - \frac{(st_{alta})^2}{2!} + \frac{(st_{alta})^3}{3!} \dots$$

Ahora remplazando los valores de A y B en la ecuación (6)

$$V_1(s) = - \left[\frac{I_p}{s + \frac{1}{RC}} \right] \left(\frac{1}{C} \right) \left[1 - snT + \frac{s^2 n^2 T^2}{2!} \dots \right] \left(\frac{1}{s} \right) \left[st_{alta} - \frac{s^2 t_{alta}^2}{2!} + \frac{s^3 t_{alta}^3}{3!} \dots \right]$$

$$V_1(s) = - \left[\frac{I_p}{s + \frac{1}{RC}} \right] \left(\frac{1}{C} \right) \left[1 - snT + \frac{s^2 n^2 T^2}{2!} \dots \right] \left[t_{alta} - \frac{s^2 t_{alta}^2}{2!} + \frac{s^3 t_{alta}^3}{3!} \dots \right] \quad (7)$$

El valor de CD o componente continua de este voltaje se halla tomando el límite a cero para la variable s (frecuencia cero) a la ecuación (7).

$$V_1(s) = \lim_{s \rightarrow 0} - \left[\frac{I_p}{sC + \frac{1}{R}} \right] \left[1 - snT + \frac{s^2 n^2 T^2}{2!} \right] \left[t_{alta} - \frac{s^2 t_{alta}^2}{2!} + \frac{s^3 t_{alta}^3}{3!} \dots \right]$$

$$V_{1CC} = -R * I_p * t_{alta} / T$$

$$\boxed{V_1(t) = -I_p * R * t_{alta} * f} \quad (8)$$

Esta es la ecuación general que hemos demostrado matemáticamente del conversor de frecuencia a voltaje CD de la salida en la primera etapa del amplificador operacional.

Como podemos analizar que es proporcional a la frecuencia de la señal del alternador.

Ahora remplazando por sus valores respectivos de

$$I_p = 1.8mA$$

$$R = 8.1K\Omega$$

$$t_{alta} = 1.1mSeg.$$

Tenemos una ecuación proporcional a la frecuencia del alternador como se muestra en la ecuación siguiente

$$V_1(t) = 0.0161 * f \quad (9)$$

Diseño y elección de los componentes del convertidor de frecuencia a voltaje:

En los siguientes cálculos, seleccionaremos los dispositivos con sus respectivos parámetros de potencia. El circuito temporizador NE/SE 555 monolítico es altamente estable capaz de producir retardos exacto de tiempo, u oscilaciones.

Primer cálculo, determinación de la corriente del pulso monoestable: A continuación hallaremos el valor de la corriente $I_p(t)$ de saturación del transistor Q_3 .

Por catálogo de diseño sabemos que los transistores de baja potencia tienen una corriente $I_{Cmax} \approx 200mA$. Para que el transistor Q_3 funcione como conmutador, lo recomendable es que la corriente de colector en saturación I_p tiene que ser mucho menor que la corriente I_{Cmax} , en este caso lo

recomendable es que $I_p = \frac{I_{Cmax}}{100}$, remplazando el valor

tenemos la corriente $I_p = 2mA$.

Según la ley del Ohm del circuito de la figura 4-06 la corriente I_p es como sigue.

$$\frac{18V - V_{CEQ3}}{R_8} = 2mA$$

, donde $V_{CEQ3} \approx 0$ en estado de saturación.

Entonces $R_8 = 9K\Omega$ (Este es el valor de la resistencia R_8 que comercialmente en el mercado no se consigue, pero sí encontramos de $10K\Omega$, entonces asumiendo este valor de la resistencia hallaremos la corriente de saturación I_p real del transistor Q_3 .

$I_p = \frac{18V}{10k\Omega} = 1.8mA$. Esta es el valor real de la corriente de saturación del transistor Q_3 que hemos hallado para remplazar en la ecuación (8).

Segundo cálculo, determinación de la duración del pulso monoestable:

Calcularemos el tiempo de la señal alta rectangular del temporizador monoestable 555, seleccionando los siguientes valores de

$$C_5 = 0.1\mu f, R_6 = 10K\Omega$$

$$t_{alta} = 1.1C_5 * R_6 \quad (10)$$

Remplazando lo valores tenemos el siguiente resultado

$$t_{alta} = 1.1(0.1\mu f)(10K\Omega)$$

$$t_{alta} = 1.1mSeg.$$

Tercer cálculo, determinación de la resistencia R en el filtro pasabaja de corriente del convertidor f/v:

En el diseño del conversor de frecuencia a voltaje CD se obtuvo experimentalmente un valor muy importante. En la primera etapa del conversor de frecuencia de 1 V para 62.3 Hz de la señal del alternador. Este valor es muy importante porque nos ayuda calcular la resistencia R de la ecuación (8).

$$V_1 = -I_p * R * t_{alta} * f$$

Como dato tenemos

$$I_p = 1.8mA$$

$$t_{alta} = 1.1mSeg.$$

$$1V = (1.8mA) (R) (1.1mS)(10/5.5)(62.3Hz)$$

$R \approx 8.1K\Omega$ (Esta resistencia es la suma de las resistencias de $R_{10} = 3.3K\Omega$ más la variación del potenciómetro R_{11} de $10K\Omega$. Estos valores podemos justificar de la siguiente manera:

Asumimos el valor de un potenciómetro de $10K\Omega$ por ser un valor muy comercial, fácil de conseguir.

Según la gráfica tenemos una relación de la ecuación

$$R_{fijo} + \frac{R_{variable}}{2} = 8.1K\Omega \quad (11)$$

Remplazando los valores tenemos lo siguiente

$$R_{fijo} + \frac{10}{2} = 8.1K\Omega$$

$$R_{fijo} = 3.1K\Omega$$

(Esta resistencia no es lo comercial, pero sí asumimos un valor comercial de $3.3K\Omega$)

$$R_{fijo} = 3.3K\Omega$$

Ahora remplazando los valores hallados de la ecuación (8) resulta ser proporcional a la frecuencia del alternador como lo muestra la ecuación

Cuarto cálculo, determinación de las resistencias del divisor de tensión:

Como primer parámetro del diseño tenemos que la máxima amplitud de señal ingreso del amplificador operacional es de 18 Voltios según el catálogo de diseño.

$$V_1 = 18 \text{ Voltios}$$

$P = 0.125$ Vatios (Valor asumido por conveniencia a la mitad de una resistencia de $\frac{1}{4}$ de vatio que es 0.250 vatios)

$$P = \frac{V_1}{\sqrt{2}} * I_1$$

Remplazando el valor correspondiente hallaremos la corriente eficaz nominal.

$$0.125 = \frac{18}{\sqrt{2}} * I_1$$

$$I_1 = 10mA$$

La única manera de evitar el valor máximo eficaz de la corriente I_1 es restringiendo la corriente I_1 . Para ello asumiendo los valores muy elevadas de las resistencias R_3 y R_2 como se demuestra a continuación.

$$R_3 = 15K\Omega \text{ (Valor asumido)}$$

$$P = R_3 * I_1^2$$

$$0.125 = 15K * I_1^2$$

$$I_1 = 3mA$$

Como puede observar este valor de la corriente I_1 de 3mA es mucho menor que el valor nominal, con este valor se puede garantizar que las resistencias del divisor de tensión no se deterioren con el tiempo.

El valor que calcularemos es el de R_2 , para que la tensión pico a la entrada del operacional no sobrepase los 18 voltios.

Este valor nos garantiza una tensión aceptable del señal (V_1) en el amplificador.

Como parámetro de dato experimental tenemos que la tensión del alternador en vacío es de 21 voltios, con este valor ya podemos demostrar un valor muy importante. La señal de ingreso (V_1) del amplificador operacional. Por división de tensión tenemos la señal de ingreso al amplificador.

$$V_1 = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_2} \right) * (\text{Señal del alternador})$$

$$V_1 = \left(\frac{15}{10 + 15} \right) * 21$$

$$V_1 = 12.6 \text{ Voltios eficaz.}$$

$$V_1 = 17.8 \text{ Voltios de Amplitud.}$$

Estos dos valores hallados nos da la garantía que el amplificador operacional trabajará dentro de sus valores de diseño.

Quinto cálculo, determinación del potenciómetro para el umbral de tensión:

Para evitar que pequeñas tensiones de ruido ingresen al convertidor F/V a través del convertidor de senoidal a cuadrado, se requiere una señal de referencia que defina un umbral de tensión, se asume un potenciómetro de $10K\Omega$ y luego calculamos la corriente de consumo para elegir la potencia máxima del potenciómetro.

$$I_{POTENCIOMETRO} = \frac{18V - (-18V)}{10k\Omega} = 3.6mA$$

$$W_{POTENCIOMETRO} = V * I = 36V * 3.6mA = 0.129W$$

Entonces asumimos:

$$W_{potenciometro} \approx 0.5Vatios$$

Sexto cálculo: Como ya se ha mencionado anteriormente para que el transistor Q_1 de baja potencia trabaje en el estado de conmutación, lo conveniente es que $I_{CQ1} = 2mA$.

Por la ley de tensiones tenemos que

$$5 = R_5 * I_{CQ1} + V_{CEQ1}$$

$$R_5 = \frac{5V - V_{CEQ1}}{2mA} \text{ Donde } V_{CEQ1} = 0 \text{ por estado de saturación}$$

$$R_5 = 2.5K\Omega$$

Este valor no se encuentra comercialmente en el mercado, pero sí el valor de $3.9K\Omega$, entonces asumiremos este valor para determinar la corriente de I_{CQ1}

$$I_{CQ1} = \frac{5V}{3.9K\Omega} = 1.28mA$$

Séptimo cálculo, determinación de la resistencia de base de Q_1 :

En esta etapa se quiere convertir una tensión cuadrada bipolar a cuadrada TTL unipolar, utilizando por un lado un diodo D_1 de señal 1N4148 para bloquear la parte negativa de la señal cuadrada, de modo que no se dañe la unión base emisor de Q_1 , en el ciclo positivo se entrega a la base del transistor Q_1 una corriente limitada por R_4 que se calculara, tomando como parámetro de diseño que la corriente de base debe asegurar la saturación del transistor Q_1 por el que asumiremos una corriente de colector:

$$I_{c1} = 5V / 3.9K = 1.28 \text{ mA}$$

Resolviendo la ecuación de la corriente de la figura tenemos los siguientes valores:

18 V: Es el valor de la fuente de alimentación

3V: Diferencia entre tensión de alimentación y de saturación en Op.Amp.

0.7 V: Es la tensión de conducción del diodo y base-emisor del transistor Q_1 .

$$I_{BASE} = \frac{18V - 3V - 0.7 - 0.7}{10K\Omega} \approx 1.4mA$$

Octavo cálculo, determinación de los componentes del temporizador monoestable:

Calculamos el tiempo de disparo ($t_{disp.}$) determinado por los capacitores $C_1 = 1\eta f$, $C_2 = 3.3\eta f$ y la resistencia $R_5 = 2.7K\Omega$. Determinado por la siguiente fórmula.

$$t_{disp.} = (C_1 + C_2) * R_5$$

Remplazando los valores resultan

$$C_{equiv} = 1\eta f + 3.3\eta f = 4.3\eta f$$

$$t_{disp.} = 4.3\mu f * 2.7K\Omega$$

$$t_{disp.} = 11.61\mu S$$

Para que la operación sea satisfactorio del temporizador monoestable 555 es necesario hacer cumplir las siguientes condiciones y quedando demostrado que

$$t_{disp.} \ll t_{alta}$$

Otra de las condiciones que también debe cumplirse es que

el tiempo (t_{alta}) sea mucho menor que el período de oscilación de la señal del alternador. En este caso el período de la oscilación de la señal es de 300Hz en vacío.

El período

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{300} = 0.003Seg.$$

$$t_{disp.} \ll t_{alta} \ll T$$

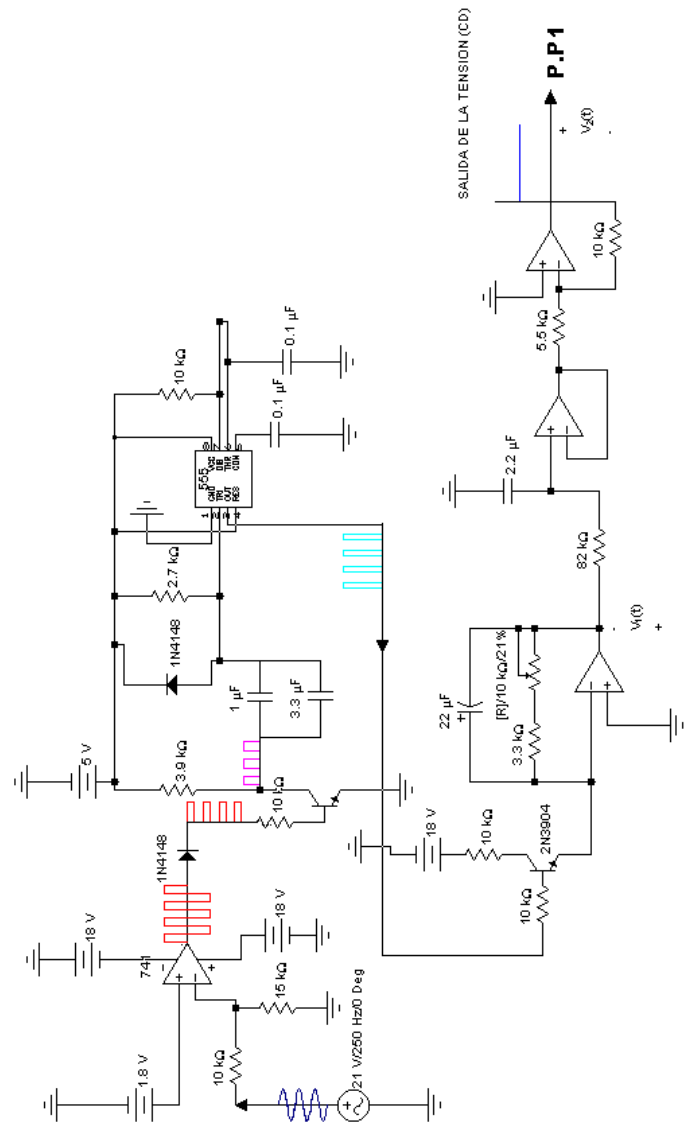


Fig. 12 Diagrama general del Convertor de frecuencia a Voltaje

Comparador de tensión

Se realiza el mismo diseño anteriormente explicado para el relé de máxima y mínima tensión.

4. CONCLUSIONES

- Se logro diseñar el sistema de protección para minicentrales hidroeléctricas, mediante el diseño electrónico de relés de protección con alta confiabilidad.
- Se logro el diseño del Relé de frecuencia.
- Se logro el diseño del Relé de Máxima y Mínima Tensión.
- Se logro realizar la programación de rutinas de prueba utilizando el software AVTS conjuntamente con el equipo de pruebas PULSAR.
- Al realizar las pruebas del relé de máxima y mínima tensión, se pudo obtener errores que se

encuentran por debajo del 1%, lo cual es bueno ya que es aceptable tener errores de hasta 5%. Por lo tanto la implementación e instalación de dicho relé es viable, ya que tiene muy buena confiabilidad.

- Los costos de cada uno de los relés diseñados se encuentran por debajo del 5% de toda la minicentral, por lo tanto es viable su implementación.
- La utilización del AVTS conjuntamente con el PULSAR, permite que la realización de las pruebas a los relés se haga de manera mas versátil y automática, facilitando su realización, contando con un reporte muy claro de las pruebas realizadas.

BIBLIOGRAFÍA

- ARROYO, Carlos. **“Protección de Sistemas de Potencia”**, Lima Perú, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad nacional de Ingeniería, Primera Edición 1995, 200pp.
- COUGHLIN, Robert. **“Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales”**, México, Editorial Prentice Hall, Quinta Edición 1999, 518pp.
- BLACKBURN, Lewis. **“Protective Relaying Principles And Applications”**, New York, Editorial Marcel Dekker, Primera Edition 1987, 545pp.
- W. Wimmer, D. Wailer, **“Recent developments in level and flow measurements techniques”**. Hydropower & Dams, Marzo 1995.
- Dirección General de Energía, **“Manual de Minicentral Hidroeléctrica”**, segunda edición 1998, 282pp
- MUHAMMAD H. Rashid, **“Electronica de Potencia”**, Editorial Pearson Educación, Segunda Edición 1995, 702pp.
- SAPAG CHAIN, Nassir. **“Preparación y Evaluación de Proyectos”**. Santiago Chile, Editorial Mc Graw - HillSan Marcos, Cuarta Edición, 2000, 440pp.