



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ING. ELECTRÓNICA

RESIDENCIA PROFESIONAL

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO ELECTRÓNICO
PARA PRÁCTICAS DE SINCRONIZACIÓN MANUAL DE UN
GENERADOR ELÉCTRICO PARA LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA
MALPASO”**

AUTOR

LUIS FERNANDO COELLO COELLO

ASESOR INTERNO

L.F.M. LESTER ACOSTA MAZA

ASESOR EXTERNO

ING. ELÍAS DOMÍNGUEZ INTERIANO

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS AGOSTOS 2016

INDICE

CAPITULO 1	4
1.1 INTRODUCCIÓN.....	5
1.2 PROBLEMÁTICA.....	6
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	7
1.4 OBJETIVOS.....	8
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	8
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
CAPITULO 2	
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ÁREA EN QUE SE PARTICIPO.....	10
2.1.1 CFE Y LA ELECTRICIDAD EN MÉXICO.....	10
2.1.2 CENTRAL HIDROELÉCTRICA MALPASO.....	10
2.2 MISIÓN Y VISIÓN.....	11
2.2.1 NUESTRA MISIÓN.....	11
2.2.2 VISIÓN AL 2030.....	11
2.3 POLÍTICA.....	11
2.4 RECONOCIMIENTOS Y CERTIFICACIÓN.....	12
2.5 OBJETIVOS E INDICADORES.....	12
2.6 ORGANIGRAMA.....	13
2.7 UBICACIÓN.....	14
2.8 DATOS TÉCNICOS.....	15
2.9 DATOS GENERALES.....	16
CAPITULO 3	17
3.1 MARCO TEÓRICO.....	18
3.1.1 GENERADORES SÍNCRONOS.....	18
3.1.2 CONSTRUCCIÓN.....	19
3.1.3 GENERADOR SÍNCRONO DE CAMPO ESTACIONARIO.....	19
3.1.4 GENERADOR SÍNCRONO DE CAMPO ROTATORIO.....	20
3.1.5 GENERADOR SÍNCRONO CON ROTOR DE POLOS SALIENTES.....	20
3.1.6 GENERADOR SÍNCRONO CON ROTOR CILÍNDRICO.....	21
3.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	22
3.2.1 VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE UN GENERADOR SÍNCRONO.....	22
3.2.2 CIRCUITO EQUIVALENTE.....	23
3.2.3 VARIABLES DE CONTROL.....	24
3.2.4 CONTROL DE POTENCIA MECÁNICA.....	24
3.2.5 CONTROL DEL CORRIENTE DE EXCITACIÓN.....	25

3.2.6 SISTEMA DE EXCITACIÓN.....	25
3.3 FUNCIONAMIENTO EN PARALELO DE GENERADORES.....	28
3.3.1 ACOPLAMIENTO DE GENERADORES SÍNCRONOS A LA RED.....	28
3.3.2 VALOR EFICAZ DE LA TENSIÓN.....	29
3.3.3 FRECUENCIA.....	30
3.3.4 ANGULO DE FASE.....	31
3.3.5 IMPORTANCIA DE LA SINCRONIZACIÓN.....	33
3.3.6 CONDICIONES NECESARIAS PARA LA CONEXIÓN EN PARALELO.....	34
3.3.7 SINCRONOSCOPIO.....	37
3.3.8 PROCEDIMIENTO PARA LA SINCRONIZACIÓN MANUAL DE GENERADORES.....	37
3.4 OSCILADOR.....	39
CAPITULO 4.....	41
4.1 PROCEDIMIENTOS Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS.....	42
4.1.1 ANÁLISIS DEL TABLERO DE TRANSFERENCIA Y SINCRONIZACIÓN DE LA C.H. MALPASO.....	42
4.1.2 DISEÑO DEL CIRCUITO.....	48
4.1.3 SIMULACIÓN.....	51
CAPITULO 5.....	54
5.1 RESULTADOS.....	55
CAPITULO 6.....	60
6.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
6.1.1 CONCLUSION.....	61
6.1.2 RECOMENDACIONES.....	61
REFERENCIAS.....	62
ANEXOS.....	64

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

Las máquinas sincrónicas son las principales fuentes de energía eléctrica de la humanidad y, por tal motivo, son las máquinas rotantes más grandes que se han construido. En la mayoría de los casos los grandes generadores funcionan todos conectados entre sí, formando un gran sistema interconectado, el que puede abarcar más de un país e incluir muchas máquinas.

Cuando se conecta una máquina sincrónica, motor o generador, a una red de potencia infinita, la red le impone condiciones a la máquina esas condiciones son precisamente la tensión en bornes y la frecuencia. Al estar impuesta la frecuencia, queda impuesta la velocidad en su valor sincrónico. Como las máquinas sincrónicas solamente convierten energía a la velocidad sincrónica, no se las puede conectar directamente a una red, de alguna forma se debe hacer que, en el momento de la conexión, se encuentren girando a la velocidad sincrónica o a una velocidad muy próxima.

Los equipos de sincronización son necesarios en las centrales donde un generador debe ser acoplado a la red, o en subestaciones que necesitan conectar en paralelo dos líneas de transmisión ya sincrónicas.

Los interruptores de potencia pueden ser cerrados únicamente si las tensiones en ambos lados del interruptor abierto están en sincronismo. De lo contrario, se pueden producir perturbaciones en la red, disparo del interruptor, o, en casos extremos, daños en el generador y el transformador.

La sincronización de generadores con redes o la de una red con otra es un asunto muy crítico y delicado. En el pasado se necesitaba una mano muy tranquila y plena concentración, mientras que el pulso se aceleraba.

En este reporte se explicaran las actividades realizadas del Diseño y Construcción de un dispositivo electrónico para prácticas de sincronización manual de un generador eléctrico para la Central Hidroeléctrica Malpaso.

1.2 PROBLEMÁTICA

La central hidroeléctrica Malpaso cuenta con 6 unidades generadoras de los cuales los primeros 4 trabajan en modo de generador síncrono. Las unidades 5 y 6 trabajan de modo generador o condensador. Todas las unidades se interconectadas al AGC (control automático de generación) y esta a su vez a El Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) cuyo objeto es ejercer el Control Operativo del Sistema Eléctrico Nacional.

Para que las unidades se pongan en paralelo con la red el CENACE solicita la conexión de un generador al operador de la central hidroeléctrica. Para poner en paralelo a un generador podemos dividir el proceso en 3 pasos rodado, excitado y sincronización.

La sincronización forma parte de un proceso muy importante para la generación de energía eléctrica en la central. Dicho proceso es de forma automática y la lleva a cabo un sincronizador SYNCHROTECT de la marca ABB modelo SYN 5201. Los pasos que realiza este equipo son:

- ✓ Secuencia de fase
- ✓ Ajuste de frecuencia
- ✓ Ajuste de tensión
- ✓ Ajuste de desfasamiento
- ✓ Acople a la red

Sin embargo como todo equipo electrónico no siempre es perfecto, este proceso tiene un límite de 4 minutos pasando este tiempo el operador tiene que pasar a modo manual y hacer la sincronización. Cabe mencionar que la mayoría del personal de operación ha obtenido sus conocimientos de forma empírica. Es por eso que el departamento de Control e Instrumentación de la Central Hidroeléctrica Malpaso decidió elaborar un proyecto para crear un dispositivo simulador del proceso de sincronización manual de un generador síncrono a la red.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La sincronización manual es un proceso que el personal de operación debe conocer. Específicamente el comportamiento de las señales de salida de un generador síncrono (voltaje, frecuencia, defese). También los valores que están permitidos y las consecuencias que trae no realizar una buena sincronización.



Fig.1 Tableros CH Malpaso.

En las peores condiciones, las tensiones entre los dos sistemas pueden ser dos valores dos veces la tensión máxima en operación de uno de los dos sistemas, o un sistema puede dejar en cortocircuito a otro. En estas situaciones se pueden dar corrientes muy grandes que generan esfuerzos en ambos sistemas. Estos esfuerzos, en sus máximas consecuencias, pueden provocar la rotura de los ejes del rotor y de la turbina.

Por lo cual se decide elaborar este proyecto con el fin de que el personal de operación tenga conocimientos más técnicos y pueda practicar como se realiza una sincronización manual cuando el equipo SYNCHROTECT ABB pasa del tiempo límite.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y Construir un dispositivo electrónico para prácticas del proceso de sincronización manual de un generador eléctrico para la Central Hidroeléctrica Malpaso.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Simular las señales de frecuencia y voltaje de un generador.
- Simular las señales de frecuencia y voltaje del sistema (red).
- Controlar el voltaje de generador (subir bajar) con ayuda de un potenciómetro.
- Controlar la frecuencia de generador (subir bajar) con ayuda de un potenciómetro.

CAPÍTULO

II

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ÁREA EN QUE SE PARTICIPO

2.1.1 CFE Y LA ELECTRICIDAD EN MÉXICO

La generación de energía eléctrica inició en México a fines del siglo XIX. La primera planta generadora que se instaló en el país (1879) estuvo en León, Guanajuato, y era utilizada por la fábrica textil “La Americana”. Casi inmediatamente se extendió esta forma de generar electricidad dentro de la producción minera y, marginalmente, para la iluminación residencial y pública.

La CFE comenzó a construir plantas generadoras y ampliar las redes de transmisión y distribución, beneficiando a más mexicanos al posibilitar el bombeo de agua de riego y la molienda, así como mayor alumbrado público y electrificación de comunidades.

El servicio al cliente es prioridad para la empresa, por lo que se utiliza la tecnología para ser más eficiente, y se continúa la expansión del servicio, aprovechando las mejores tecnologías para brindar el servicio aún en zonas remotas y comunidades dispersas. CFE es reconocida como una de las mayores empresas eléctricas del mundo, y aún mantiene integrados todos los procesos del servicio eléctrico.

2.1.2 CENTRAL HIDROELÉCTRICA MALPASO

La Presa Malpaso, formalmente llamada como la Presa Nezahualcóyotl, es una presa que se encuentra ubicada en el cauce del Río Grijalva entre los municipios de Mezcalapa, Berriozábal, Tecpatán y Ocozocoautla de Espinosa en el noroeste del estado de Chiapas, cuenta con una central hidroeléctrica que tiene una capacidad de generar 1,080 mega watts de energía eléctrica. La construcción de la presa fue hecha entre los años de 1958 y 1966, fue la primera y más importante del conjunto de obras hidroeléctricas que fueron realizadas en la cuenca del río Grijalva para el desarrollo del sureste de México, su embalse cuenta con una capacidad de 9,605 hectómetro cúbicos de agua en una superficie aproximada de 110 km².

2.2 MISIÓN Y VISIÓN

2.2.1 NUESTRA MISIÓN

Prestar el servicio público de energía eléctrica con criterios de suficiencia, competitividad y sustentabilidad, comprometidos con la satisfacción de los clientes, con el desarrollo del país y con la preservación del medio ambiente.

2.2.2 VISIÓN AL 2030

Ser una empresa de energía, de las mejores en el sector eléctrico a nivel mundial, con presencia internacional, fortaleza financiera e ingresos adicionales por servicios relacionados con su capital intelectual e infraestructura física y comercial.

Una empresa reconocida por su atención al cliente, competitividad, transparencia, calidad en el servicio, capacidad de su personal, vanguardia tecnológica y aplicación de criterios de desarrollo sustentable.

2.3 POLÍTICA

Prestar el servicio público de transmisión y distribución de energía eléctrica, así como la generación y comercialización de electricidad y otros servicios relacionados, que generen valor económico y rentabilidad, procurando el desarrollo nacional. Considerando los aspectos ambientales y de seguridad, la mejora continúa de la eficacia del Sistema Integral de Gestión con compromiso de:

- ✓ Formar y desarrollar el capital humano.
- ✓ Gestión eficiente de los riesgos.
- ✓ Prevenir la contaminación y aprovechar de manera responsable los recursos naturales.
- ✓ Cumplir con la legislación reglamentación y otros requisitos aplicables.
- ✓ Mejorar continuamente la gestión y los resultados de la Comisión Federal de Electricidad.

2.4 RECONOCIMIENTOS Y CERTIFICACIÓN

- Sistema de Administración de Seguridad y Salud en el trabajo.
NMX-SAST-001-IMNC-2008
- Sistema de Gestión Ambiental
ISO 14001:2004
- Sistema de Gestión de Calidad
ISO 9001:2008
- Reconocimiento por haber sido seleccionada como la mejor central del proceso Hidroeléctrico 2007
- Certificado Industria México Limpia PROFEPA 2016

2.5 OBJETIVOS E INDICADORES

Objetivos	Indicadores
1. Garantizar el abasto de Suministro Eléctrico	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tiempo de Interrupción por Usuario (Sin Eventos) ✓ Disponibilidad (Generación CFE) ✓ Compromiso del Servicio
2. Incrementar la Competitividad	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Pérdidas de Energía [%] ✓ Costo Total de kWh ✓ Ejecución del Despacho Económico
3. Dar un Buen Servicio al Cliente	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Satisfacción del Cliente del Eléctrico (Encuesta) ✓ Inconformidades por casa 1000 usuarios (sin imprevistos)
4. Trabajar con Criterios de Desarrollo Sustentable, Responsabilidad Social y Equidad de Género	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cumplimiento de Metas Ambientales ✓ Capacidad de Generación con Terminología Limpia ✓ Cumplimiento del Programa Interno de Responsabilidad social ✓ Cumplimiento del Programa Interno de Equidad de Género
5. Participar en Nuevas Áreas de Oportunidad	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Disponibilidad de servicio (fibra óptica)
6. Promover el Liderazgo y Desarrollo Profesional	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Frecuencia (Accidentes) ✓ Gravedad (Días) ✓ Clima organizacional ✓ Ausentismo por Enfermedad por Trabajador
7. Contar con Fortaleza Financiera	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cobranza

2.6 ORGANIGRAMA

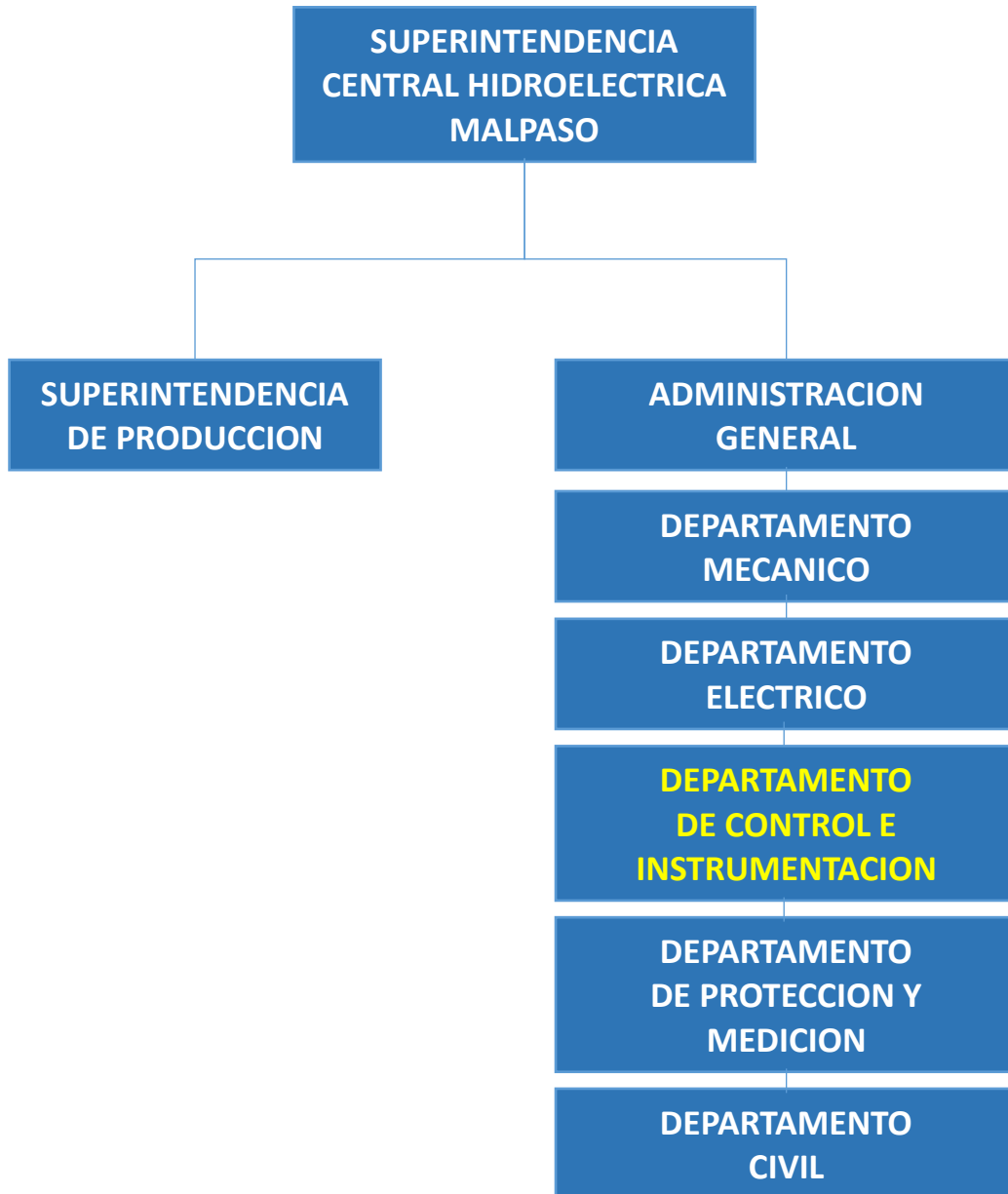


Fig.2 Organigrama C.H. Malpaso Departamento de Control e Instrumentación.

2.7 UBICACIÓN

Raudales Malpaso, Mezcalapa, Chiapas C.P.29600



Fig. 3 Vista satelital C.H. Malpaso, google maps



Fig. 4 Vista aérea C.H. Malpaso.

2.8 DATOS TÉCNICOS

Tubería de presión

Marca: Sakai Iron
Unidades:6
Longitud: 79.15M
Diámetros Principio: 20.64Mm.
Final:26.99 Mm
Espesor principio: 20.64 Mm.
Final: 26.99 Mm.

3 transformadores monofásicos por unidad

Marca: Mitsubishi/ Parsons Peebles
Capacidad: 45,000/ 60,000/
75,000KVA
Clase: 0A/F0A/F0FA
Voltaje: 400,000/15,000 volts

Turbinas principales

Marca: Mitsubishi/ Escher Wyss
Tipo: Francis Vertical
Unidades Instaladas: 6
Diámetro Rodete; 5.6M.
Potencia 250.000 C.V.
Caída: 85.00 M.
Gasto: 240 M³/S
Velocidad: 128.57 R.P.M.
Velocidad de desboque: 254 R.P.M.

6 unidades generadoras

Marca: ASEA
Tipo: sombrilla
Capacidad: 218,000 KVA 8,390
A. EST.80°CROT.86°C
225,000 KVA 8,660
A. EST.86°C ROT. 105°C
Factor de potencia: 0.95
Voltaje nominal: 15, 000 volts.
Revoluciones por minuto:
128.57
Frecuencia: 60 c.p.s.
Voltaje de excitación: 500 Volts
Corriente de Excitación: 1400
Amp.

Interruptor de aire comprimido tripolar

Tipo: PP0=-11K
Corriente nominal: 2,000 Amp.
Voltaje nominal: 400 KV.

2.9 DATOS GENERALES

Generación anual: $2,754 \times 10^6$ KWH

Área de embalse: 30, 000 Ha.

Volumen de embalse: 12.960×10^6 M³

Volumen para generación de energía: $7,300 \times 10^6$ M³

Tensión de generación: 15,000 V

Tensión de elevación: 400,000 V

Tensión de líneas de transmisión: 400 / 230 / 115 KV

Bóveda: 104.50 M.S.N.M

Piso excitadores: 89.50 M.S.N.M

Elevaciones casa de máquinas

Piso generadores: 85.00 M.S.N.M.

Piso turbinas: 81.50 M.S.N.M.

Eje horizontal turbina: 77.50 M.S.N.M.

Piso de válvulas: 71.50 M.S.N.M.

Piso tubo de aspiración: 65.50 M.S.N.M.

Capacidad actual: 1, 080,000 KW

Elevación máxima: 188 M.S.N.M.

Elevación nivel máximo de operación: 182.5 M.S.N.M.

Elevación nivel mínimo de operación: 144 M.S.N.M.

CAPÍTULO

III

3.1 MARCO TEÓRICO

3.1.1 GENERADORES SÍNCRONOS

Las máquinas síncronas son máquinas eléctricas cuya velocidad de rotación n (r.p.m.) está vinculada rígidamente con la frecuencia f de la red de corriente alterna con la cual trabaja, de acuerdo con la expresión:

$$n=60f/p$$

Donde p es el número de pares de los polos de la máquina.

Las máquinas síncronas, como cualquier otro convertidor electromecánico de la energía están sometidas al principio de reciprocidad electromagnética, pudiendo funcionar tanto en régimen generador como en régimen motor. Sin embargo en la práctica de las instalaciones eléctricas más frecuente su empleo como generadores, para producir energía eléctrica a partir de fuentes primarias de energía hidráulica, térmica o nuclear. Las frecuencias industriales de las tensiones generadas oscilan entre los 50 Hz en Europa 60 Hz en gran parte de América.

En aplicaciones especiales como es el caso de la aeronáutica, se utilizan frecuencias más elevadas, del orden de los 400 Hz, lo que trae como consecuencia una reducción del tamaño y peso de los equipos de a bordo.

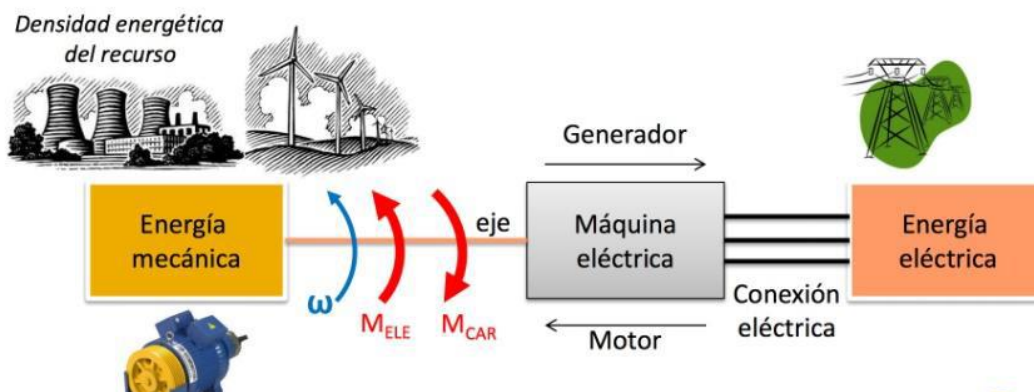


Fig.5 Flujo de energía eléctrica.

3.1.2 CONSTRUCCIÓN

Las máquinas síncronas están formadas principalmente por una parte móvil, denominada rotor, y una parte fija denominada estator. Como el resto de máquinas eléctricas, se compone de dos devanados diferenciador:

- Un devanado inductor, en forma de arrollamiento concretado o distribuido en ranuras, el cual es alimentado por corriente continua, y da lugar a los polos de la máquina.
- Un devanado inducido distribuido en forma de arrollamiento trifásico por cual circula corriente alterna.

En las máquinas pequeñas, de potencia menor a 10kVA, el devanado inducido se suele situar en el estator, en forma concentrada, sobre expansiones magnéticas llamadas polos salientes, mientras que el inducido se sitúa en el rotor, formando generalmente tres fases que se comunicas al exterior por medio de tres anillos.

3.1.3 GENERADOR SÍNCRONO DE CAMPO ESTACIONARIO

Se trata de una máquina síncrona en la que el campo generado por el rotor esta fijo y es la armadura que gira.

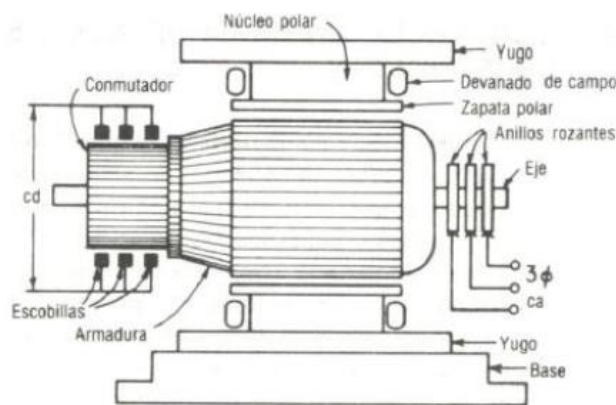


Fig.6 Generador síncrono de campo estacionario.

En la figura se representa una máquina de campo estacionario, utilizada antiguamente para convertir corriente continua en corriente alterna y viceversa. Hoy en día este tipo de máquinas ha sustituido por inversores electrónicos.

3.1.4 GENERADOR SÍNCRONO DE CAMPO ROTATORIO

Se trata de un generador en el que el campo generado en el rotor gira, permaneciendo la armadura fija.

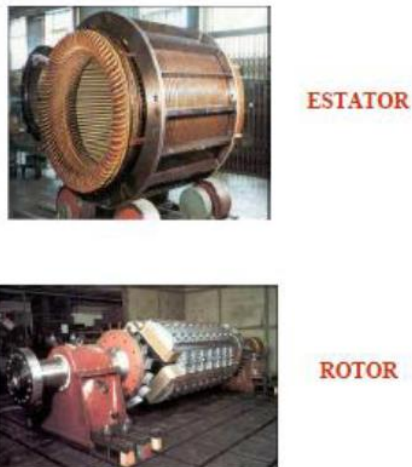


Fig.7 Representación de rotor y estator.

En la figura se representa el estator y el rotor de un generador síncrono. En este caso el estator permanece fijo y el rotor gira dentro del estator generando un sistema trifásico de tensiones. El rotor puede ser de polos salientes o cilíndricos

3.1.5 GENERADOR SÍNCRONO CON ROTOR DE POLOS SALIENTES

Los polos salientes no son muy fuertes mecánicamente, y tienen varios inconvenientes con respecto a su aerodinámica, como por ejemplo el ruido, por ello se utilizan en máquinas de velocidad baja, normalmente inferiores a las 750 rpm, como por ejemplo en turbinas hidráulicas. En la figura se muestra un rotor con cuatro polos salientes.

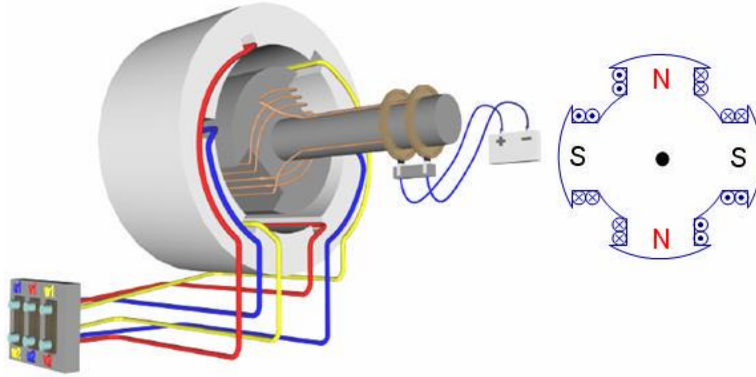


Fig.8 Rotor de polos salientes.

3.1.6 GENERADOR SÍNCRONO CON ROTOR CILÍNDRICO

El rotor cilíndrico no tiene problemas aerodinámicos, por lo que es utilizado en máquinas de dos o cuatro polos. Este tipo de rotor es impulsado por turbinas de gas de centrales térmicas

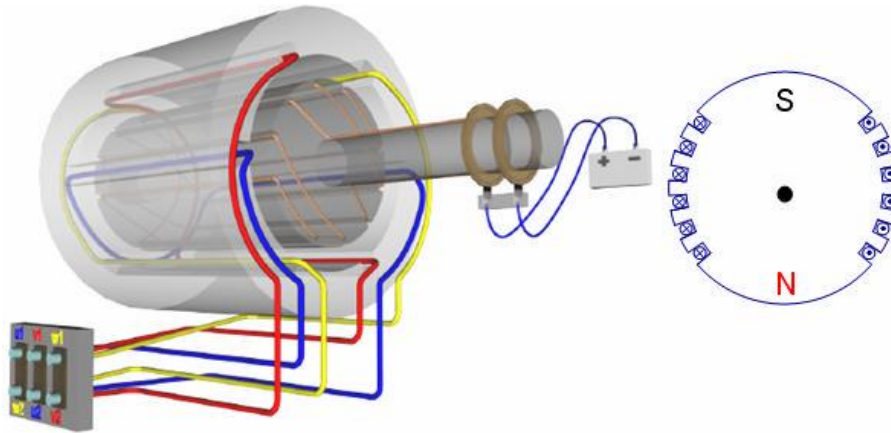


Fig.9 Rotor de polos lisos.

En la figura se muestra la disposición de un rotor cilíndrico de un generador con cuatro polos. Este tipo de rotor normalmente opera a velocidades de entre 1500 y 3000 rpm.

3.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Un generador síncrono funciona de la siguiente forma:

- El rotor es alimentado por corriente continua (se puede hacer directamente desde una batería, pero normalmente se utiliza un sistema de alimentación con retroalimentación que ajusta el valor de la corriente de excitación) formándose en el rotor un campo magnético que lo llamaremos B_R .
- El rotor gira a una velocidad n , por tanto el campo del rotor gira también a esa velocidad n .
- El campo del rotor en movimiento induce tensiones en el estator a una frecuencia f que dependerá directamente de la velocidad de giro del rotor.
- El campo originado en el estator lo llamaremos B_S , que es el campo de reacción del inducido.
- Al conectar una carga al estator circularán por él corrientes trifásicas.
- El campo resultante es la suma del campo del rotor más el campo del estator.
- La tensión final en bornes del generador no coincidirá exactamente con la generada debido a pérdidas en los devanados.

3.2.1 VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE UN GENERADOR SÍNCRONO

Los generadores síncronos se caracterizan por girar a la velocidad del sincronismo. La velocidad de la máquina dependerá directamente de la frecuencia de la red y del número de polos que tenga la máquina.

La velocidad de giro de la máquina viene por la siguiente ecuación

$$w = 4\pi f / p$$

Siendo:

ω la velocidad del rotor en rad/s

f la frecuencia de la red

p el número de polos

La potencia eléctrica se genera a una frecuencia de 60Hz, por tanto la velocidad de la máquina dependerá del número de polos.

3.2.2 CIRCUITO EQUIVALENTE

El circuito equivalente de un generador síncrono es el siguiente:

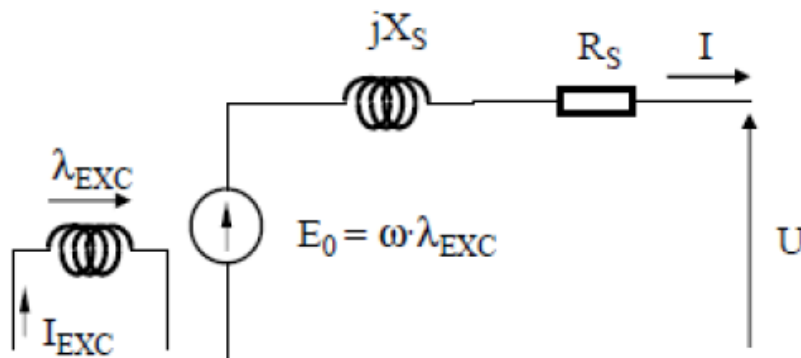


Fig.10 Circuito equivalente.

Siendo X_s y R_s la impedancia síncrona propia de la máquina.

Para la regulación de la máquina se variara E_0 y aumentara la tensión en bornes del generador y la cantidad de energía reactiva generada.

3.2.3 VARIABLES DE CONTROL

Existen de dos variables de control:

- **Potencia mecánica:** es la potencia suministrada al eje de la máquina síncrona, que se traslada a la generación eléctrica.
- **Corriente de excitación:** es la corriente que circula por el rotor, que controla el valor de E_0 .

3.2.4 CONTROL DE POTENCIA MECÁNICA

La potencia mecánica se controla haciendo girar más o menos rápido la turbina contactada al eje del generador (ya que normalmente se trata de una turbina) inyectando más o menos vapor, suponiendo el caso de una turbina de vapor.

En realidad el control de la potencia mecánica se realiza de forma indirecta mediante el regulador de velocidad, ya que este modifica la potencia mecánica para mantener la velocidad constante e igual a la fijada por el operador.

El regulador de velocidad normalmente mide la velocidad de giro del motor y calcula la posición de la válvula de vapor o combustible a la turbina para mantener la velocidad del generador constante. Por tanto, el control de la potencia está ligado al control de la frecuencia.

3.2.5 CONTROL DEL CORRIENTE DE EXCITACIÓN

La corriente de excitación se controla mediante un excitador, que puede ser una batería o un sistema de alimentación con retroalimentación.

En realidad el control de la corriente de excitación viene dado de forma indirecta por el regulador de tensión, ya que este modifica el valor de la corriente de excitación para mantener la tensión en bornes constante e igual a la fijada por el operador.

El regulador de tensión normalmente mide la tensión y corriente de salida y ajusta el valor de la corriente de excitación para mantener la tensión constante. Al modificar el valor de la tensión y de la corriente de excitación se modifica la generación de potencia reactiva, por tanto, el control de tensión está ligado a la potencia reactiva

3.2.6 SISTEMA DE EXCITACIÓN

Sistema de excitación para el funcionamiento de las máquinas síncronas, es esencial la existencia de un sistema de excitación, que, al no ser un proceso ideal, necesita de una fuente de tensión continua. Existen tres tipos de sistemas de excitación:

- a) Excitación estática. En este sistema, se toma la tensión directamente de la red y, mediante un convertidor electrónico, se pasa de corriente alterna a corriente continua. En este diseño, la excitación “ataca” directamente al rotor, y dispone de escobillas y anillos para realizar la conexión. Sin embargo, en el arranque no se puede disponer de la tensión de red porque el generador no está conectado. Una posible solución, puede ser el aprovechamiento del magnetismo remanente del núcleo, que podría inducir una pequeña tensión en el circuito de excitación suficiente como para poder excitar al núcleo. El inconveniente es que este magnetismo remanente no es suficiente para cebar a la máquina debido al entrehierro.

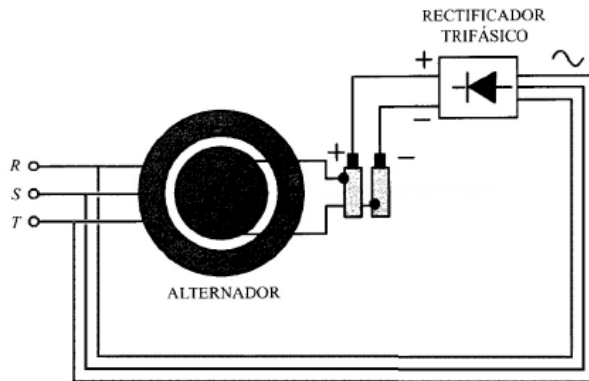


Fig.11 Excitación estática.

- b) Excitación rotativa con diodos giratorios. Este sistema utiliza lo que se denomina como excitatriz, que no es más que una máquina síncrona inversa, es decir, con el bobinado inducido en el rotor y el inductor en el estator, cuyo estator es alimentado por la red, previo paso por el rectificador para pasar a corriente continua. Al ser una máquina pequeña, con escaso entrehierro, esta cebada desde el principio. A la salida del rotor de la excitatriz se dispone un puente de diodos acoplado al eje para transformar la corriente alterna en continua, de manera que se pueda alimentar al rotor de la máquina grande. La desventaja de este sistema es que sigue dependiendo de la conexión a la red.

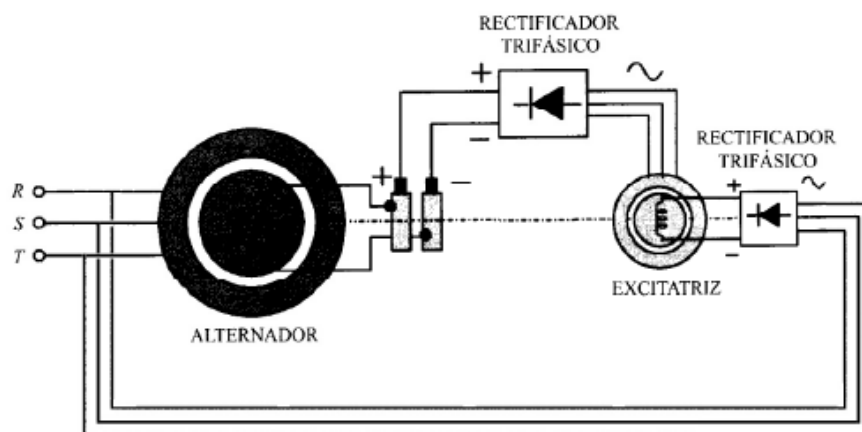


Fig.12 Excitación rotativa con diodos giratorios.

- c) Excitación rotativa con dos excitatrices. En este diseño se utilizan dos excitatrices, la más pequeña de ellas de imanes permanentes en el rotor inductor y un bobinado inductor en el estator y el inducido en el rotor. A la salida de esta excitatriz, se conecta al rotor de la máquina grande, a través de un puente rectificador de diodos para pasar a corriente continua. Al ser la excitatriz pequeña de imanes permanentes, no necesita excitación, y por lo tanto, deja de depender de la red.

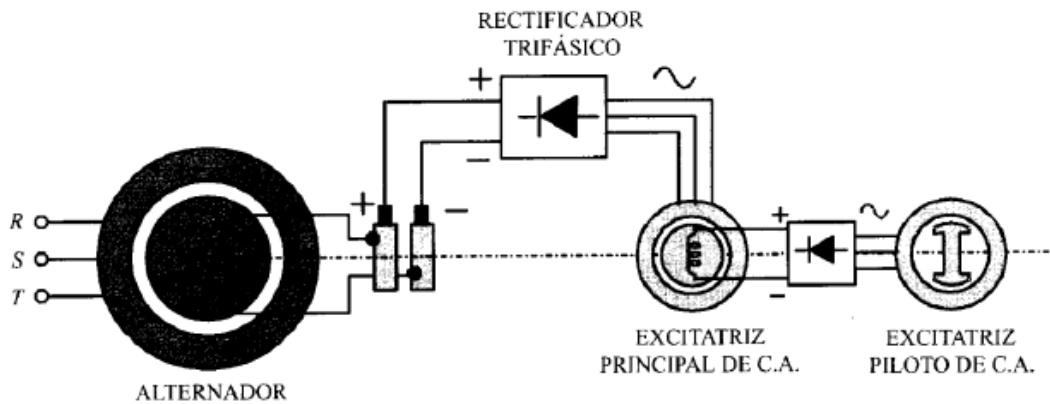


Fig.13 Excitación rotativa con dos excitadores.

3.3 FUNCIONAMIENTO EN PARALELO DE GENERADORES

Un sistema de energía eléctrica consiste en general de varias estaciones de generación, trabajando todas ellas en paralelo. Son numerosas las ventajas de la subdivisión de un sistema de generación en varias estaciones, tanto desde el punto de vista económico como estratégico. Las principales son:

- Varios generadores pueden alimentar más carga que uno solo.
- Teniendo varios generadores se incrementan la confiabilidad del sistema de potencia, puesto que en caso de falla de uno de ellos, no se suspende totalmente la potencia a la carga.
- El tener varios generadores funcionando en paralelo permite que se pueda desconectar uno, o más de ellos, para mantenimiento.
- Cuando se eleva la demanda promedio del sistema se puede adquirir unidades adicionales para satisfacer la nueva demanda.

3.3.1 ACOPLAMIENTO DE GENERADORES SÍNCRONOS A LA RED

Con el objetivo de incrementar la eficiencia y la fiabilidad del sistema de producción, las centrales de producción eléctrica, y por consiguiente los generadores que componen, se conectan en paralelo por medio de redes de transporte y distribución. Este conjunto de generadores se comporta como un generador gigantesco en el cual se mantiene constantes la tensión y la frecuencia. Esto es así porque la conexión a la red de un nuevo generador no altera la ni los valores de tensión ni de frecuencia, ya que su potencia respecto al conjunto de generadores conectados es insignificante.

La conexión en paralelo de un generador a la red requiere una serie de operaciones complejas que constituyen la llamada sincronización. Es inmediato que para que la conexión del generador se realice sin ninguna perturbación, es necesario que el valor instantáneo de la tensión de la red. De este requerimiento, se derivan una serie de condiciones para que en el desarrollo de la sincronización no haya ninguna incidencia:

- Mismos número de fases del generador y de la red.
- Idéntica secuencia de fases del generador y de la red.
- Igual valor eficaz de la tensión del generador y la red.
- Misma frecuencia del generador y de la red.
- Igual ángulo de fase entre la tensión del generador y la tensión de la red.

3.3.2 VALOR EFICAZ DE LA TENSIÓN

El valor eficaz de la tensión del generador y el valor eficaz de la tensión de la red deben de ser idénticos con una tolerancia del $\pm 5\%$. En los generadores síncronos, el módulo de la tensión se controla con la corriente del circuito de excitación situado en el rotor.

Si los módulos de las tensiones del generador y de la red no son iguales, se generara un fijo de potencia reactiva que tratara de compensar esta diferencia. En este sentido su puede dar dos casos:

- Que el valor eficaz de la tensión del generador sea mayor que el valor eficaz de la tensión de la red, lo que supone que el generador esta sobre-excitado y cederá potencia reactiva a la red.

- Que el valor eficaz de la tensión del generador sea menor que el valor eficaz de la tensión de la red, lo que significa que el generador está subexcitado y absorberá potencia reactiva de la red.

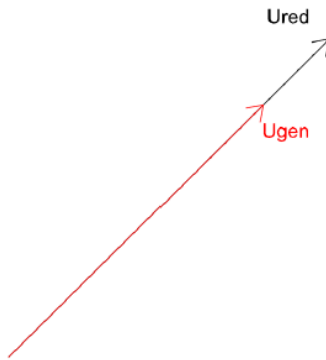


Fig.14 Fasores de las tensiones del generador y la red.

Por tanto, esta diferencia de módulos de tensión da lugar a unas corrientes reactivas que disminuyen la eficiencia del sistema. Por otro lado, si se conecta un generador de tensión distinta a la de la red, la tensión de la red no cambiara. Sin embargo, en este caso el factor de potencia del generador sí que cambia, y si el módulo de la tensión del generador es mucho más baja que de la red, podría llegar a funcionar como motor. Para evitar esta situación. Es necesario instalar una protección de potencia inversa.

3.3.3 FRECUENCIA

La frecuencia del generador y de la red deben ser idénticas con un margen de $\pm 0.2\%$. En generadores síncronos la frecuencia del campo magnético del rotor, y en consecuencia, la frecuencia de las tensiones inducidas en el estator, vienen impuestas por la velocidad de giro del rotor. Cuando el interruptor de acoplamiento

se cierra, la frecuencia del campo magnético es gobernada por la red. Existen dos posibles situaciones:

- Si la frecuencia de giro del rotor y la frecuencia de la red esta considerablemente próximos, en el instante de cerrar el interruptor, el par transitorio para llevar el rotor a sincronismo es aceptable.
- Si la frecuencia de giro del rotor es significativamente distinta, es decir, existe un deslizamiento, entonces al cerrar el interruptor de acoplamiento se producirá un par transitorio muy grande en los sistemas mecánicos para acelerar o desacelerar el rotor y ponerlo en fase con la red. Estos pares generan esfuerzos mecánicos y eléctricos que pueden producir daños de fatiga al generador y a la turbina.

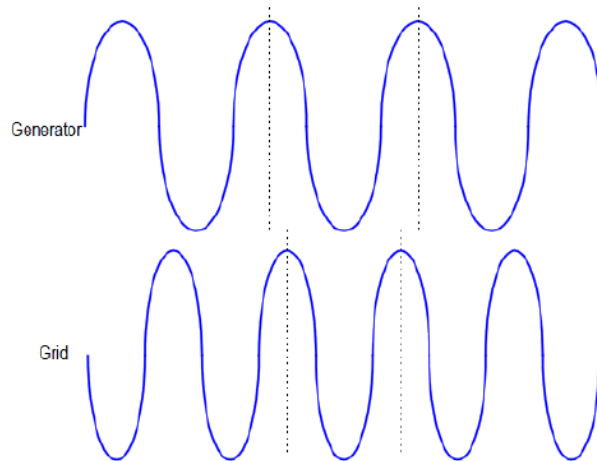


Fig.15 Generador con una frecuencia distinta a la red.

3.3.4 ANGULO DE FASE

El ángulo de fase entre la tensión del generador y la tensión de red, debe ser cero en instante de acoplamiento, con un margen de $10 \pm 10^\circ$. Una vez que el generador y la red tienen la misma tensión y casi la misma frecuencia, el ángulo de fase se controla con un sincronoscopio. El interruptor de acoplamiento debe cerrarse

cuando la aguja del sincronoscopio pase por las doce horas, que es cuando el ángulo de fase es cero.

La velocidad de giro de la aguja del sincronoscopio es exactamente la diferencia entre frecuencia del generador y la de la red; por este motivo, se establece un margen de frecuencias para poder controlar el ángulo de fase. Si se cierra el interruptor cuando el ángulo es significativamente distinto de cero, se producirán elevadas corrientes y esfuerzos en el generador como consecuencia la desaceleración inducida por la red para ponerlo en fase. El peor caso, en el cual los esfuerzos y las corrientes son máximos, es el cierre de interruptor con un ángulo de 180° , representado en el sincronoscopio por las seis horas.

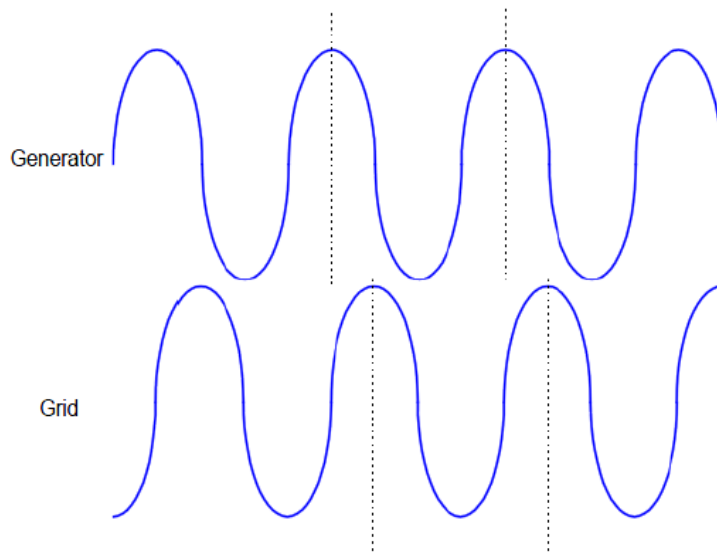


Fig.16 Generador desfasado con la red.

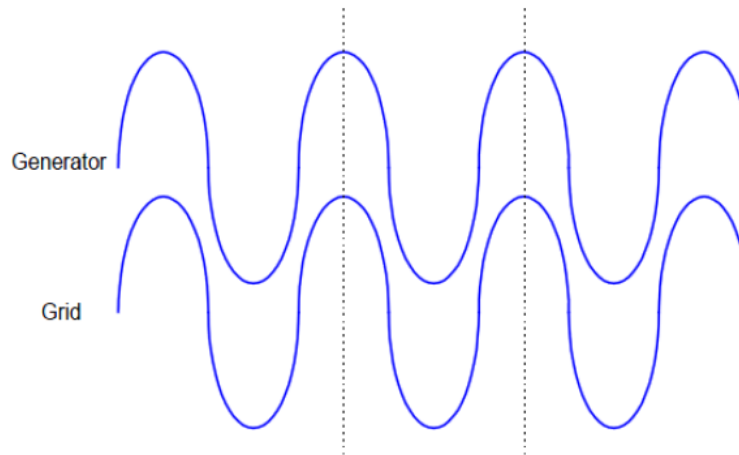


Fig.17 Generador en fase con la red.

3.3.5 IMPORTANCIA DE LA SINCRONIZACIÓN

Cuando dos generadores o sistemas de producción eléctrica están conectados en paralelo al mismo sistema de distribución, las fuentes de potencia deben estar sincronizadas adecuadamente. Si no es así, cuando el acoplamiento este cerrado, se producirá sobrecargas además de esfuerzos mecánicos y eléctricos.

En las peores condiciones, las tensiones entre los dos sistemas pueden ser dos valores dos veces la tensión máxima en operación de uno de los dos sistemas, o un sistema puede dejar en cortocircuito a otro. En estas situaciones se pueden dar corrientes muy grandes que generan esfuerzos en ambos sistemas. Estos esfuerzos, en sus máximas consecuencias, pueden provocar la rotura de los ejes del rotor y de la turbina.

Sin embargo, estas situaciones son externas. Los esfuerzos y el daño a los generadores y turbinas pueden sucederse a diferentes escalas, dependiendo del tipo de generador, la carga, y la magnitud de los errores en la sincronización de los sistemas en el momento del cierre del acoplamiento.

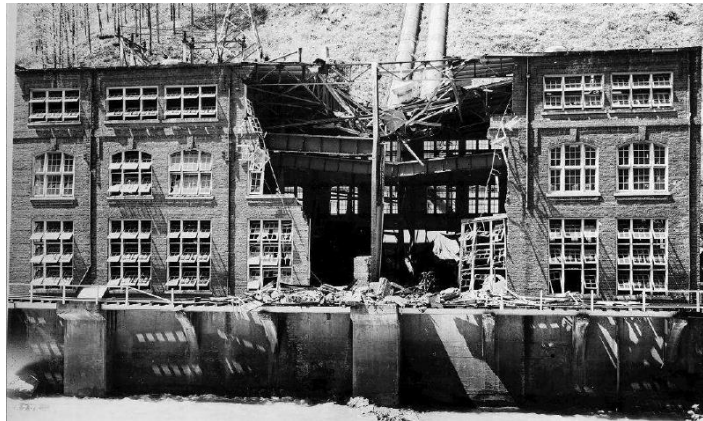


Fig.18 Consecuencias en un edificio de central hidroeléctrica por una inapropiada sincronización.

3.3.6 CONDICIONES NECESARIAS PARA LA CONEXIÓN EN PARALELO.

La figura 19 muestra un generador sincrónico G1 que alimenta una carga, junto con otro generador G2 que se va a conectar en paralelo con el primero, accionando el interruptor S2. Si este interruptor se cierra arbitrariamente en cualquier momento, los generadores se expondrían a graves daños, por lo tanto se deben cumplir las siguientes condiciones para poder conectarlos:

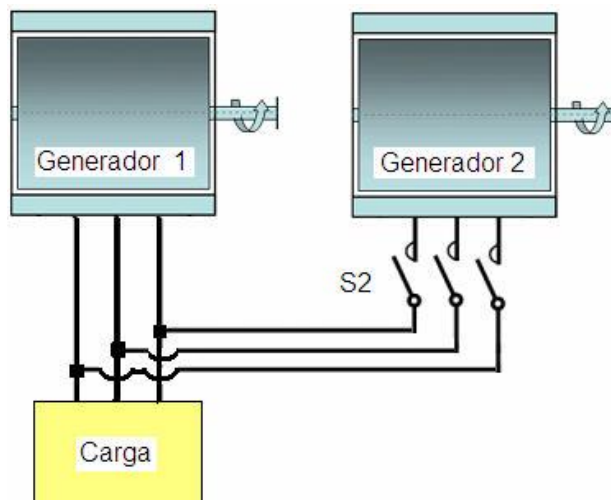


Fig.19 Generador en paralelo.

1. La frecuencia del generador nuevo, llamado generador entrante, debe ser ligeramente más alta que la frecuencia del sistema en funcionamiento. Si cuando se conecten los alternadores, no son aproximadamente iguales, se presentan grandes oscilaciones de potencia hasta que los generadores se estabilicen en una frecuencia común. Las frecuencias de los dos alternadores deben ser aproximadamente iguales, pero no exactamente iguales. Deben diferenciarse en una pequeña cantidad, de tal forma que los ángulos de fase del generador entrante cambien lentamente con relación a los ángulos de fase del sistema. Esto permitirá observar el ángulo entre tensiones, y podrá cerrarse el interruptor cuando estén exactamente en fase.
2. Los voltajes de línea efectivos de los dos generadores deben ser iguales. Si los voltajes no son exactamente los mismos en cada una de las fases que se conectan entre sí, se generará un flujo de corriente muy grande cuando el interruptor se cierre.
3. Los voltajes de los dos generadores deben tener la misma secuencia de fases. Si el orden de la secuencia de fases es diferente, entonces aunque un par de tensiones estén en fase, como se ve en la figura 3, los otros dos pares de tensiones están, desfasados 120° ; si los generadores se conectaran en esta forma, no habría problema con la fase *a*, pero aparecerían altas intensidades por las fases *b* y *c*, dañando ambos alternadores.

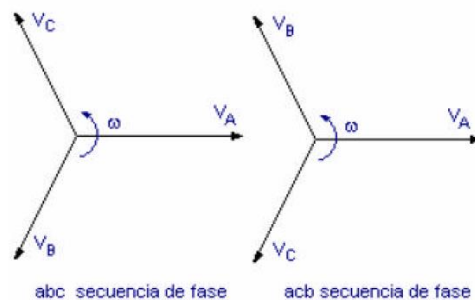


Fig.20 Posibles secuencias de fase de un sistema trifásico.

La condición de igualdad de secuencia de fases es una condición que puede comprobarse previamente y, una vez verificada, no existe la posibilidad de cambio alguno durante el funcionamiento del generador.

4. Igualdad de ángulos de fase; una vez que las magnitudes de voltaje y frecuencia entre el generador 1 y el generador 2 son iguales, se presenta un desfase entre los voltajes de fase idénticas; es decir entre la *fase a* del generador 1 y la *fase a* del generador 2, tal como se muestra en la figura 4, el mismo ángulo de desfase existe entre las otras dos fases, *b* y *c*.

Por lo tanto, se debe comprobar que el ángulo de desfase mencionado sea igual a cero, y esto se verifica cuando el voltaje entre las dos fases es igual a cero.

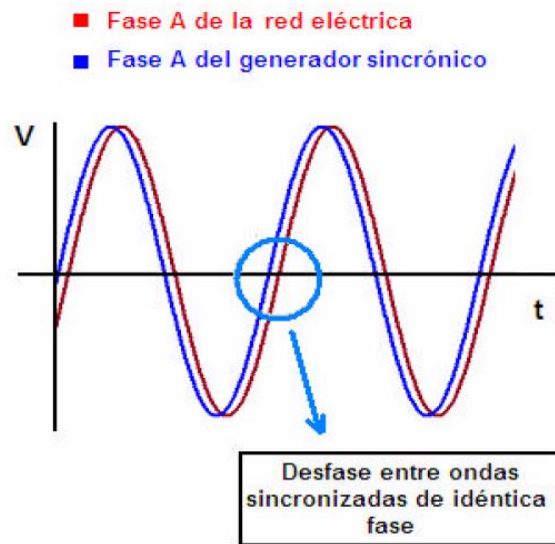


Fig.21 Desfase entre voltajes semejantes del Generador y la Red.

3.3.7 SINCRONOSCOPIO

En un equipo de sincronización de máquinas síncronas el aparato más destacado es el sincronoscopio. A lo largo de los años el sincronoscopio ha ido evolucionando desde el más primitivo formado por unas bombillas, que muestran la diferencia de ángulos entre las tensiones del generador y la red en función de si reciben o no tensión, a otros más sofisticados formados por un microprocesador y pantallas que muestran la diferencia angular de las tensiones y frecuencias.

Actualmente existen diversos tipos de sincronoscopios en el mercado disponibles, los cuales se diferencian por ser monofásicos o trifásicos, analógicos o digitales, por su tensión de entrada (los podemos encontrar de baja y media tensión), por su frecuencia de entrada (40-70Hz), por el modo de mostrar la información (ya sea por medio de una aguja, leds o una pantalla digital), por su seguridad (simple o doble canal) y por sus dimensiones.

3.3.8 PROCEDIMIENTO PARA LA SINCRONIZACIÓN MANUAL DE GENERADORES.

La forma más simple de verificar las condiciones de sincronismo y asegurar que se cumplen cuando se cierre el interruptor de acoplamiento, es mediante un sincronoscopio.

Primero, se lleva el generador entrante hasta una velocidad cercana a la de sincronismo, es decir se gradúa la frecuencia f_1 del generador entrante para que sea ligeramente mayor a la frecuencia del sistema f_2 , para esto se emplea un frecuencímetro al generador y otro al sistema.

Segundo, la tensión en los bornes del generador se ajusta variando la corriente de excitación del generador entrante, utilizando voltímetros, hasta lograr que la tensión del generador entrante medida por el voltímetro U_2 se iguale a la tensión de línea del sistema medida por el voltímetro U_1 , indicado en la figura 5.

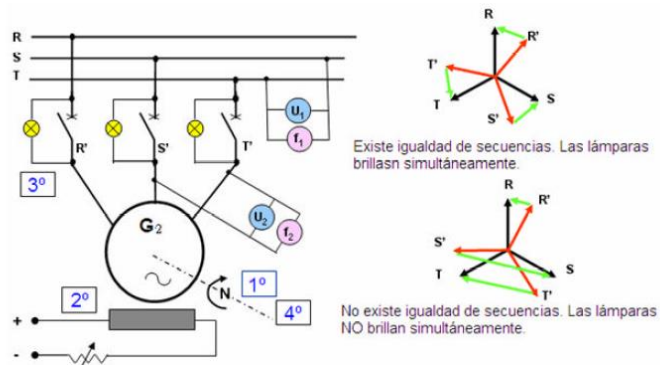


Fig.22 sincronización por lámparas.

Tercero, se debe comparar la secuencia de fase del generador con la secuencia de fase del sistema. Si las secuencias difieren, el intercambio de las conexiones en dos de las tres fases del generador corrige la secuencia de fases. El intercambio debe realizarse en los terminales del generador que se va a conectar y nunca en las barras del lado de la carga, ya que el cambio de secuencia crearía muchos problemas en diferentes tipos de carga.

Para determinar la secuencia de fases se emplea un instrumento denominado secuencímetro, el cual se utiliza transitoriamente por una sola vez.

Cuarto, una vez que casi se igualen las frecuencias, los voltajes en los dos sistemas cambiarán de fase entre sí muy lentamente, y se reduce el parpadeo de las lámparas; cuando los tres bombillos se apagan, la diferencia de voltaje entre ellos es cero y por consiguiente, los sistemas se encuentran en fase, y es ahí cuando se debe cerrar el interruptor de acoplamiento. Este sistema funciona pero no es muy exacto.

Un mejor sistema es emplear un sincronoscopio, instrumento que sirve para medir la diferencia de ángulo de fase entre fases semejantes de los dos sistemas (fase a del sistema con fase a del generador, o a su vez fases b con b, o c con c).

En la figura 6 se puede apreciar como varía la curva de voltaje de la fase a; tanto del sistema, como del generador durante el proceso de sincronización.

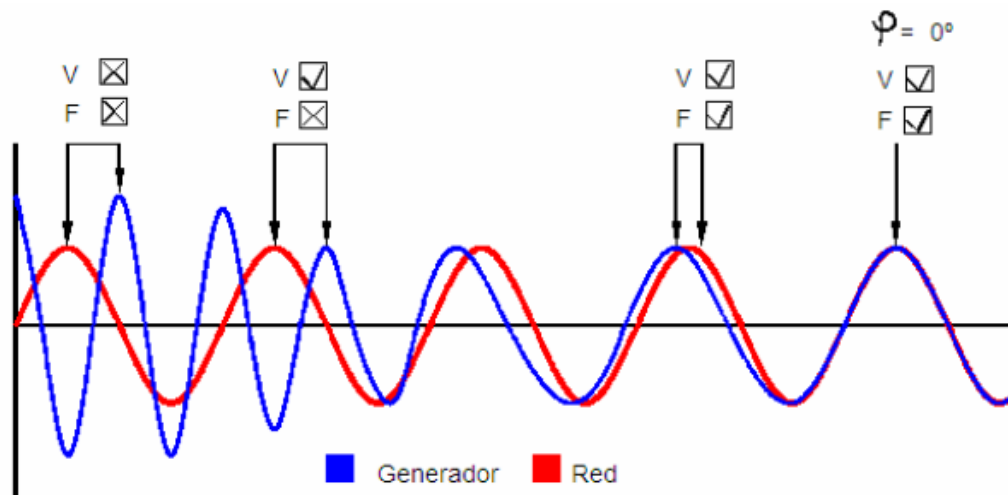


Fig.23 onda de voltaje durante el proceso de sincronización de generador y red.

3.4 OSCILADOR

Un oscilador es un circuito en el que se genera una señal de salida periódica de modo espontáneo pues solo cuenta con las alimentaciones y tierra como entradas.

El oscilador produce generalmente una señal de salida sinusoidal o una señal cuadrada. Todos los osciladores tienen una frecuencia característica de trabajo, que depende de los valores de los componentes del circuito (resistencias, condensadores, ...) y que, en algunos casos, es controlable desde el exterior por medio de una tensión aplicada (VCOs).

En los osciladores sinusoidales, pueden aparecer armónicos de orden superior que distorsionan la señal de salida.

En los osciladores cuadráticos, es interesante conocer el duty cycle, que es el cociente entre el tiempo en que la señal está en alta y el periodo. Idealmente, debe ser un 50 %. Aparte de su forma, los osciladores se clasifican en osciladores lineales y de relajación.

Los osciladores lineales se caracterizan por utilizar redes RC o RLC para construir bloques con una determinada función de transferencia con una frecuencia de resonancia característica. Es por ello que estos osciladores están íntimamente ligados con los filtros lineales tratados en el tema anterior.

En cambio, los osciladores de relajación emplean circuitos inestables, que no pueden alcanzar un punto de equilibrio estable, y que pasan de un estado a otro al transcurrir un tiempo que depende de los componentes del circuito.

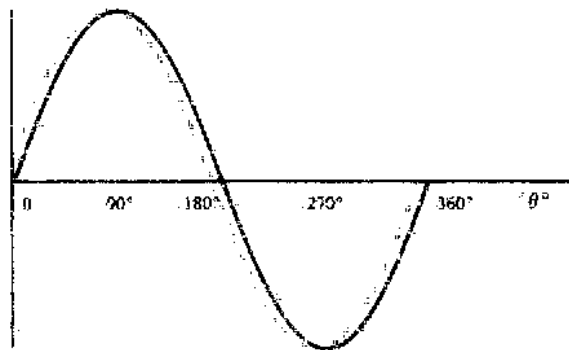


Fig.24 Forma de onda senooidal de voltaje de ca.

CAPÍTULO IV

4.1 PROCEDIMIENTOS Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS.

4.1.1 ANÁLISIS DEL TABLERO DE TRANSFERENCIA Y SINCRONIZACIÓN DE LA C.H. MALPASO

Antes de iniciar con el proceso de construcción del dispositivo electrónico, realice una investigación teórica para conocer el funcionamiento general de una central hidroeléctrica. También me fueron proporcionados manuales tanto del regulador de tensión AVR (Regulador Automático de Voltaje) y el regulador de velocidad.



Fig.25 Piso de excitatriz unidad numero I C.H. Malpaso casa de máquinas.



Fig.26 Regulador automático de velocidad unidad V marca Andritz Hydro.

Posteriormente fui conociendo las los lugares y funciones de cada una de las partes que se encuentran dentro de casa de máquinas de la central.

Luego estuve en tableros de la central, donde los operadores me fueron explicando las tareas básica que realiza un operador y maquinista en turno. También estuve presenciando varias veces el momento de sincronización automática y manual. Observe el tablero de transferencia y sincronización.



Fig. 27 Regulador Automático de voltaje AVR marca SEPAC.

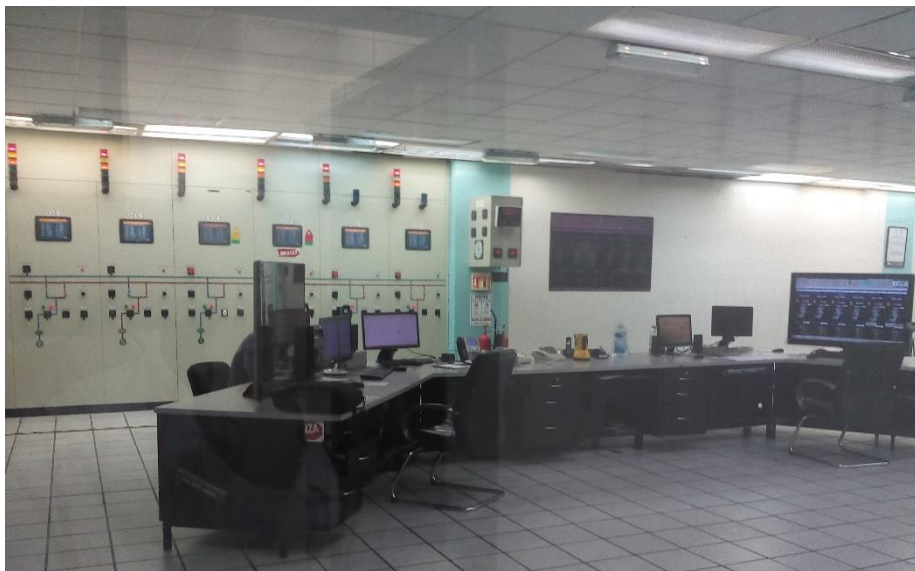


Fig.28 Tableros de Control Casa de Maquinas.



Fig.29 Monitor de estado de los generadores.

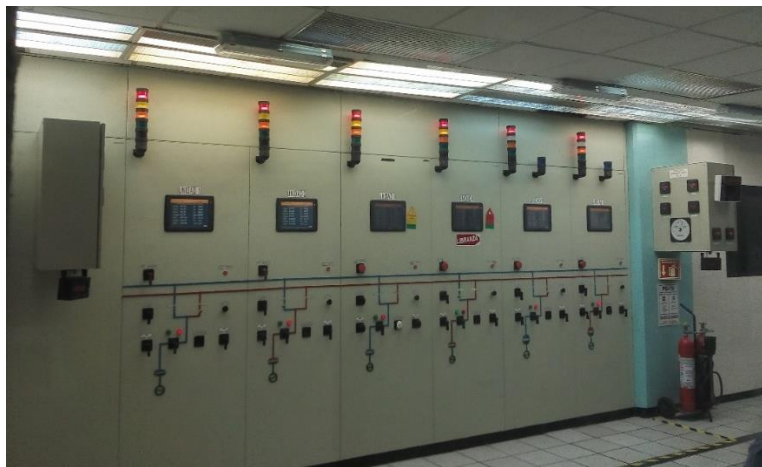


Fig.30 Panel de control de los generadores Tableros.

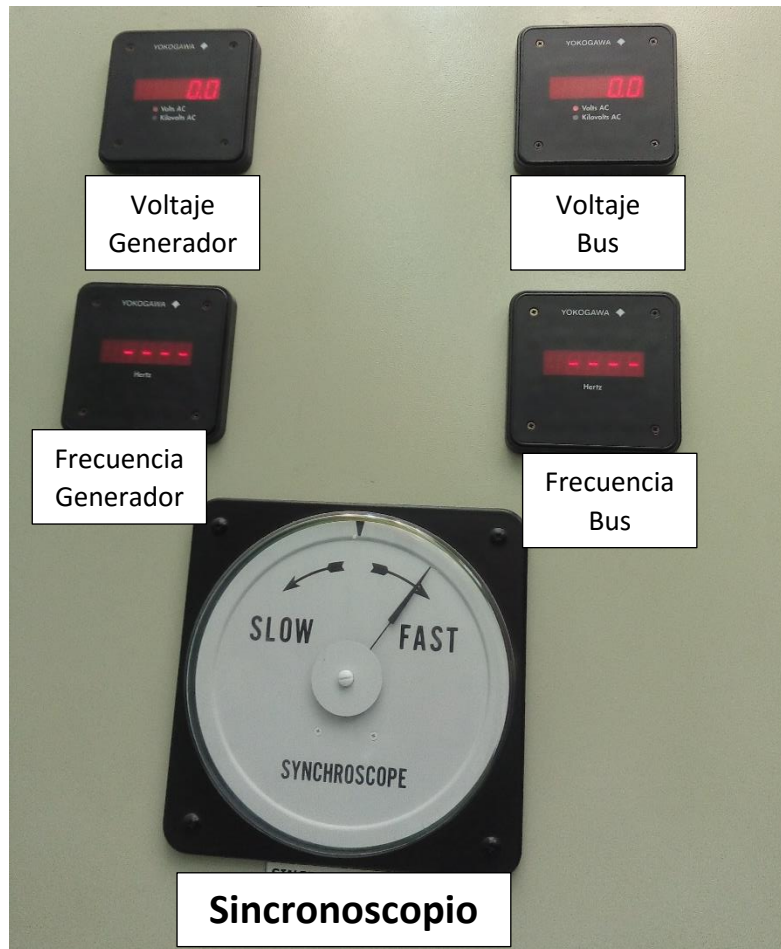


Fig. 31 Tablero de sincronización N° 2 unidades 3 y 6.

En la imagen anterior podemos observar el tablero de sincronización, los indicadores digitales superiores indican el voltaje. Del lado izquierdo el voltaje del generador y del lado derecho el voltaje de bus (red) cabe mencionar que el voltaje del generador debe igualarse al voltaje de la red 400 V.

Los indicadores inferiores miden la frecuencia el de lado izquierdo indica el valor de la frecuencia y el de la derecha la frecuencia de bus (red) para este caso es 60 Hz.

En la parte inferior central vemos un sincroscoPIO analógico de la marca YOKOGAWA modelo 120452 120 v, 60 Hz. El cual mide el desasimetro angular existente entre el generador y la red.

En la siguiente imagen podemos ver el control manual del operador para cada unidad así también el nombre de los mandos. Por ejemplo el potenciómetro 70E/90R es un switchs electromecánico tipo ménsula con el cual el operador puede subir o bajar mediante pulsos eléctricos el cual da la orden al PLC principal SIEMENS S7-400.

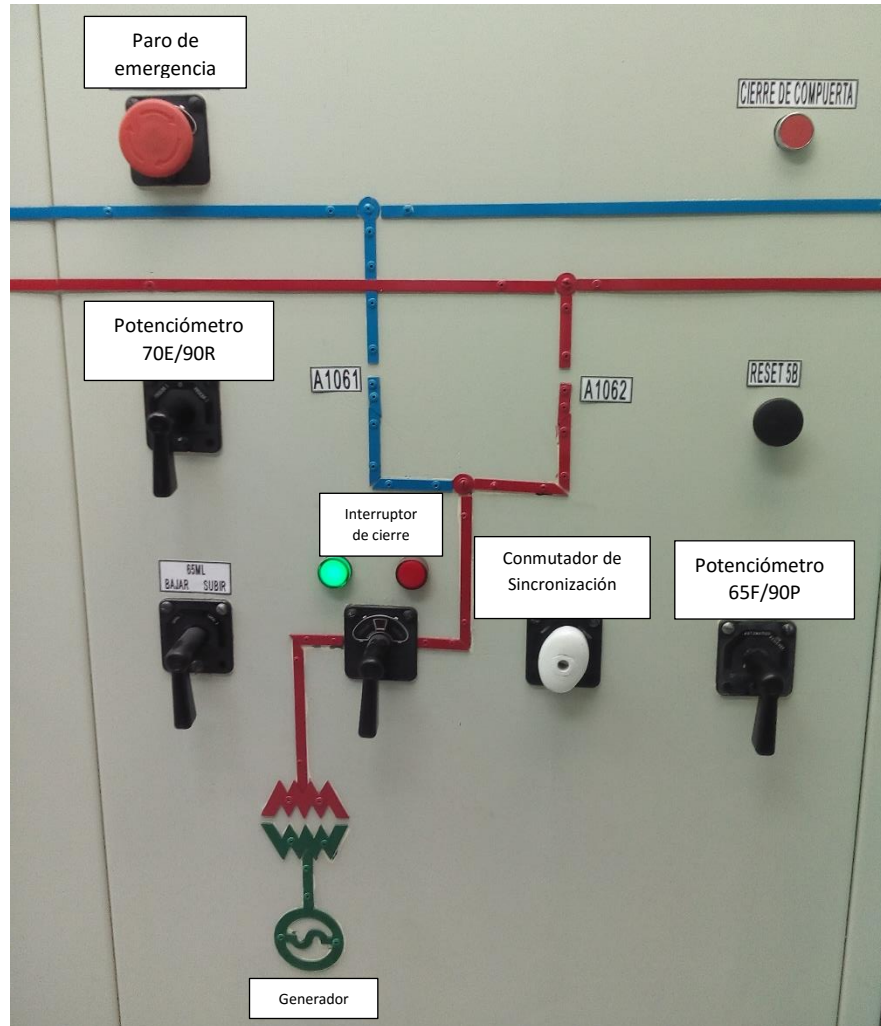


Fig. 32 mandos de operación sincronización.

La siguiente imagen muestra la conexión física del sincronoscopio en un extremo se conecta la red y en el otro extremo el generador.

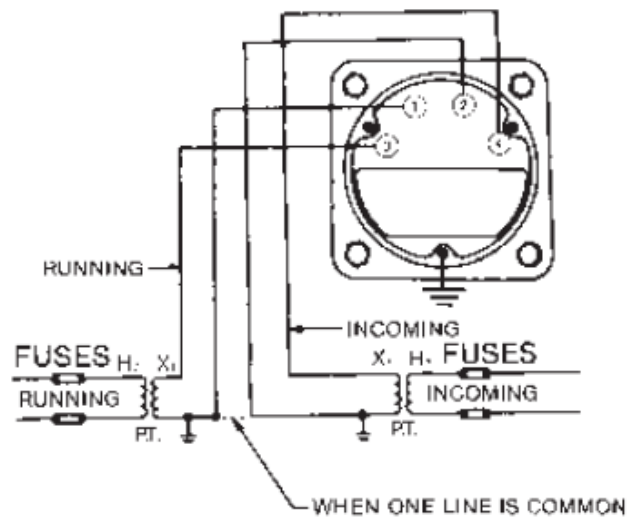


Fig.33 Conexión el sincronoscopio.

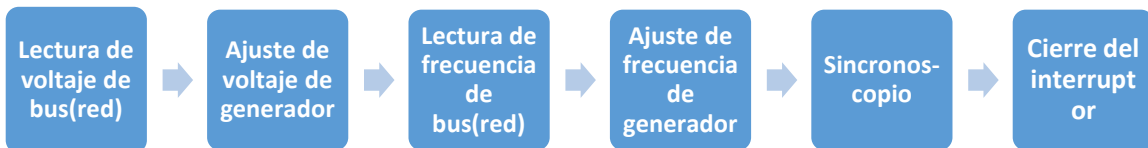


Fig.34 Pasos para realizar una sincronización manual.

4.1.2 DISEÑO DEL CIRCUITO

Para simular la señal de un generador se utiliza el integrado ICL 8038 para la crear una señal senoidal el cual se puede controlar la frecuencia y amplitud.

El generador de onda de ICL8038 es un integrado monolítico circuito capaz de producir alta precisión sinusoidal, cuadrada, triangulares, en diente de sierra y pulsos con un mínimo de componentes externos. La frecuencia (o velocidad de repetición) puede ser seleccionado externamente de 0,001 Hz a más de 300 kHz ya sea utilizando resistencias o condensadores, y la frecuencia la modulación y el barrido se puede lograr con una tensión externa. El ICL8038 está fabricada con tecnología avanzada La tecnología monolítica, utilizando diodos de barrera Schottky y delgada Las resistencias de película, y la salida es estable en un amplio intervalo de temperatura y de suministro de variaciones. Estos dispositivos pueden ser interconectado con el circuito de bucle de bloqueo de fase para reducir deriva de la temperatura a menos de 250 ppm / °C

En la siguiente imagen podemos ver el diagrama interno de los componentes que contiene el integrado ICL 8038

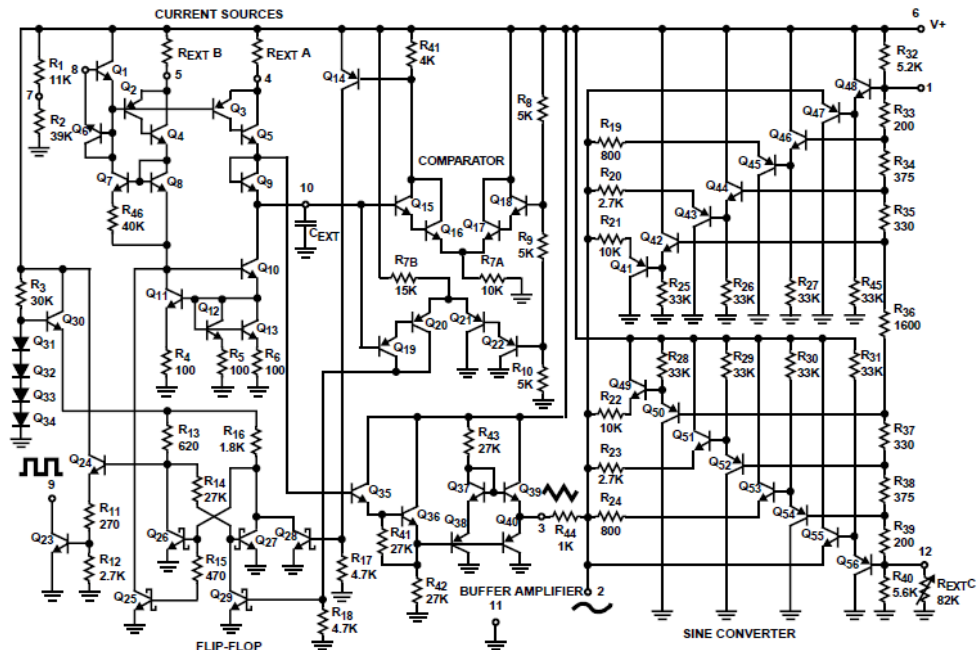


Fig.35 Diagrama interno del Integrado.

Features

- Low Frequency Drift with Temperature 250ppm/°C
- Low Distortion. 1% (Sine Wave Output)
- High Linearity 0.1% (Triangle Wave Output)
- Wide Frequency Range 0.001Hz to 300kHz
- Variable Duty Cycle 2% to 98%
- High Level Outputs TTL to 28V
- Simultaneous Sine, Square, and Triangle Wave Outputs
- Easy to Use - Just a Handful of External Components Required

Fig.36 Características del Integrado.

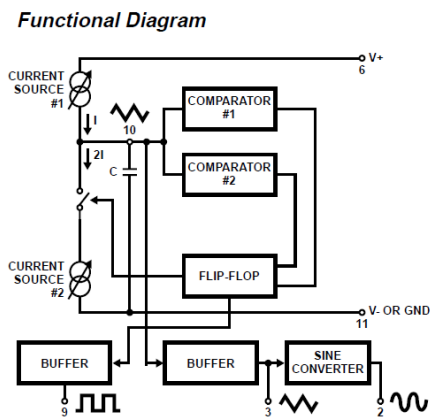


Fig.37 Diagrama a bloques interno del Integrado.

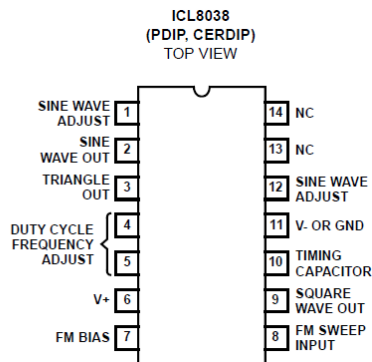


Fig. 38 Terminales ICL8038.

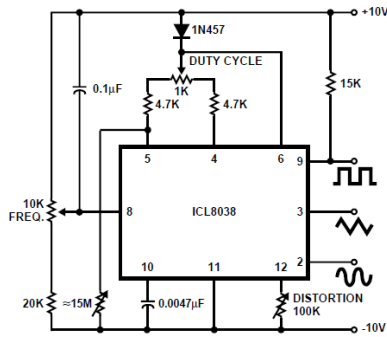


Fig.39 configuración básicas del integrado ICL8038.

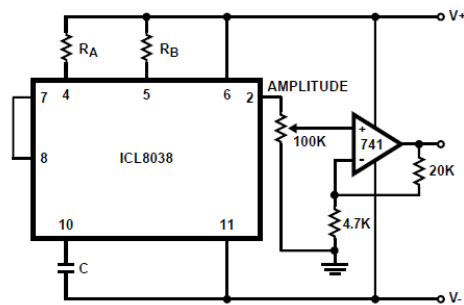


Fig.40 control de amplitud de la señal se salida del generador.

Para generar una señal senoidal implementando el integrado icl8038 se diseñó el siguiente circuito. El integrado ICL8038 es un generador de funciones capaces de producir seno, cuadrada, triangular, diente de sierra y pulsos

A través del potenciómetro RV2 de 10 Kohms se puede subir o bajar la frecuencia según sea necesario con esto se logra simular el comportamiento del control del regulador de velocidad de un generador.

Para manipular la amplitud del simulador (subir/bajar) se toma la salida la cual va a un amplificador operacional 741. Con esto se logra simular el proceso de ajuste de voltaje en una sincronización de generador a la red.

4.1.3 SIMULACIÓN

A continuación podemos ver la simulación en proteus 8 del circuito y sus valores obtenidos en el osciloscopio virtual. A través de este circuito podemos simular el comportamiento que tiene un generador después de rodar y excitar es decir como se ve a la hora de hacer el proceso de sincronización.

Para ajustar el rango de frecuencias de salida se utiliza un capacitor cerámico de 0.56uf, que va del pin número 10 a $-V_c$ del integrado según la hoja de datos del integrado ICL8038. Con esto se logró generar frecuencias de 58 hz a 5 khz

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{\frac{R_A C}{0.66} \left(1 + \frac{R_B}{2R_A - R_B} \right)}$$

or, if $R_A = R_B = R$

$$f = \frac{0.33}{RC}$$

Para ajustar el ciclo de trabajo de la salida del generador. Para minimizar la distorsión de la señal senoidal se utiliza una resistencia variable conectada al pin12.

Así, un ciclo de trabajo del 50% se logra cuando $R_A = R_B$. Por lo cual se utiliza 2 resistencias de 10kohms y una tercera resistencia conectada a cada una de las resistencias de 10kohms para lograr un ajuste más preciso y un ciclo de trabajo aproximado de 50%.

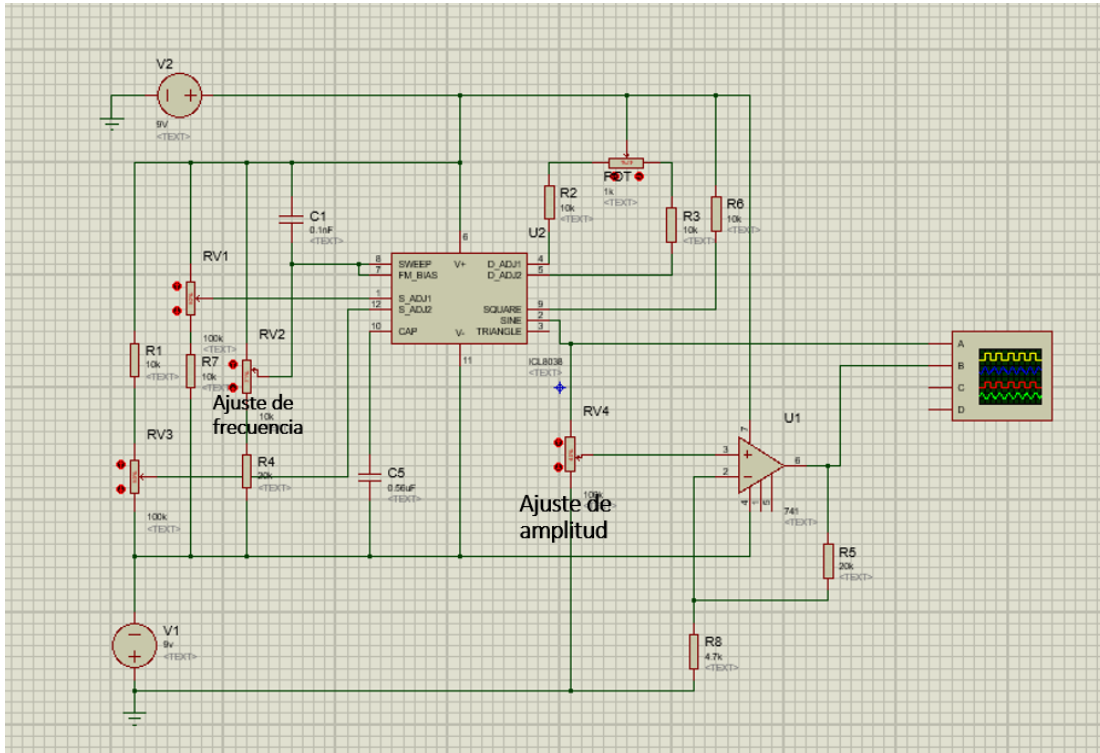


Fig.41 Icl 8038 generador monolítico.

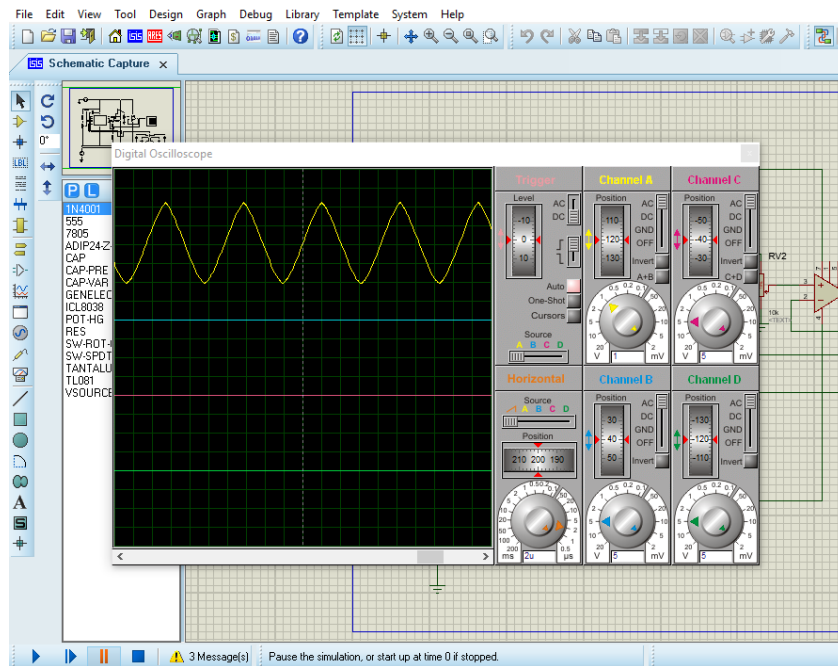


Fig. 42 Forma de onda generada por el icl8038.

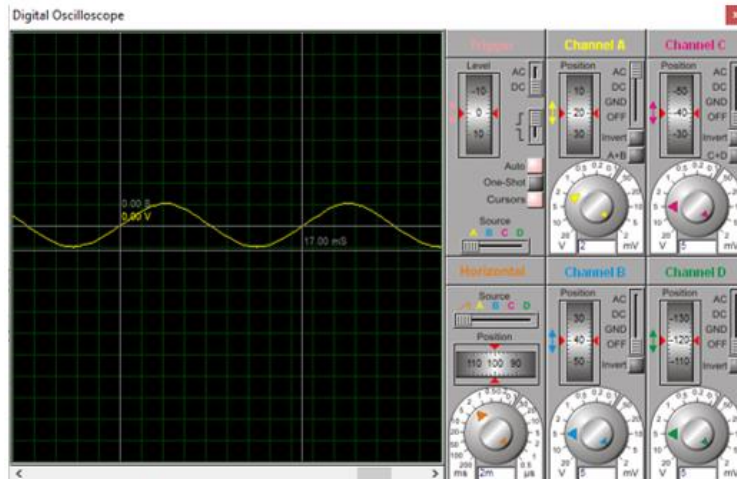


Fig.43 periodo de la señal senoidal.

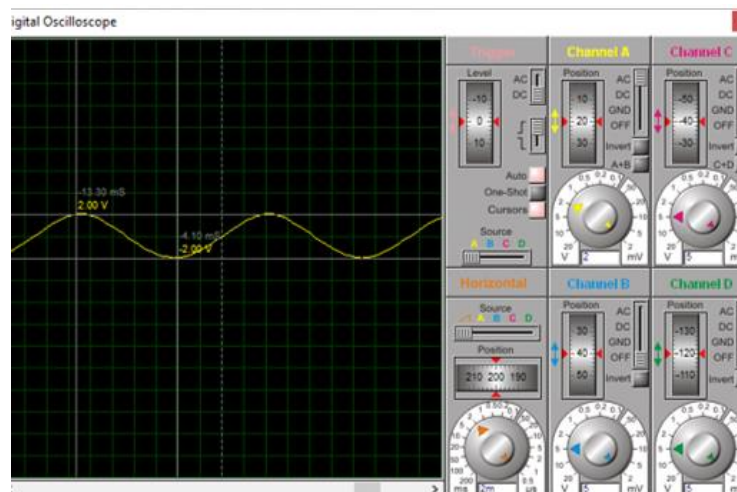


Fig. 44 Amplitud de la señal.

La imagen anterior muestra la señal de salida del integrado que se utiliza para simular la señal de salida de una fase de un generador. Vemos que tenemos un periodo de 17 milisegundos lo que da una frecuencia de 58.824 Hz. Si se manipula el potenciómetro RV2 podemos aumentar gradualmente o disminuir gradualmente la frecuencia de la salida del integrado. Finalmente con la ayuda de un amplificador operacional contactada a la salida del generador con otro potenciómetro se logra controlar la amplitud de la señal senoidal en la imagen vemos una amplitud de 4 volts.

CAPÍTULO V

5.1 RESULTADOS

A continuación se observa el comportamiento del circuito en protoboard obteniendo valores semejantes a los proyectados en la simulación en proteus.

Cabe mencionar que a la hora de probar el circuito el integrado ICL8038 fue alimentado con una fuente de corriente directa y en la salida generaba una señal senoidal que oscilaba con valores positivos, con lo cual no cumplía con el comportamiento de un generador síncrono ya que oscila solo en valores positivos.

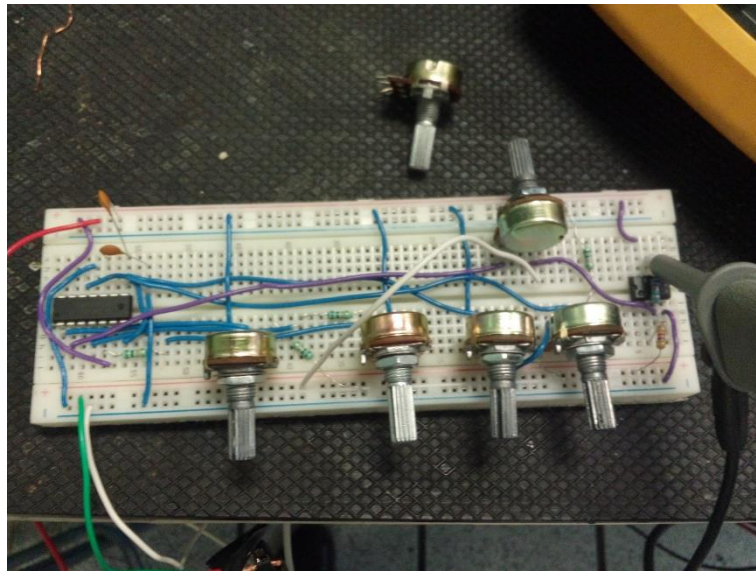


Fig.45 Pruebas del circuito en protoboard.

La solución a esta parte fue alimentar el integrado con una fuente simétrica y con esto la señal de salida osciló con valores positivos y valores negativos semejantes a un generador síncrono.

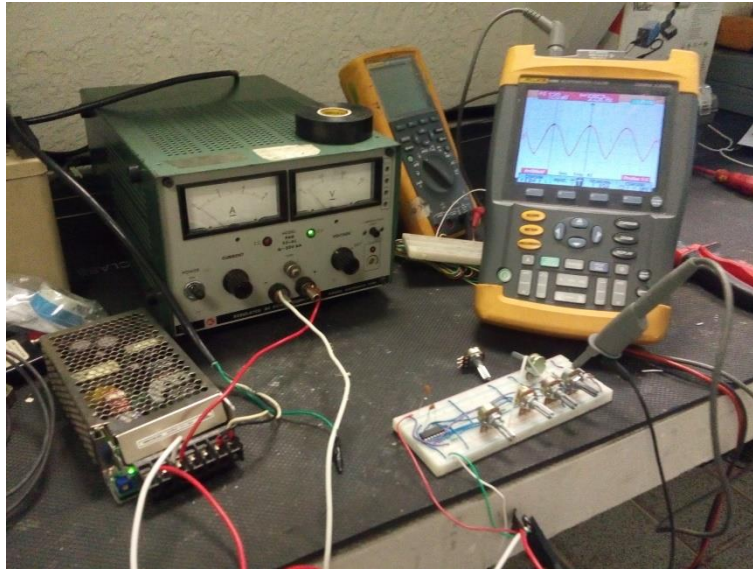


Fig.46 circuito alimentado con una fuente simétrica.

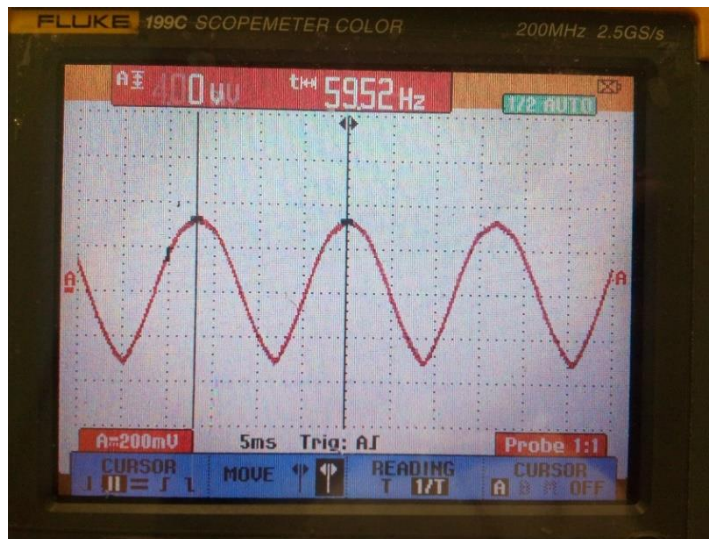


Fig.47 Forma de onda entregada por el integrado icl8038.

En la imagen anterior se puede apreciar la señal de salida del circuito obtenida con un osciloscopio FLUKE 199C con una frecuencia de 59.52 Hz sin embargo la forma de onda no es totalmente senoidal para lograrlo se tiene que manipular el potenciómetro RV1 de 100 Kohms para minimizar la distorsión de la señal.

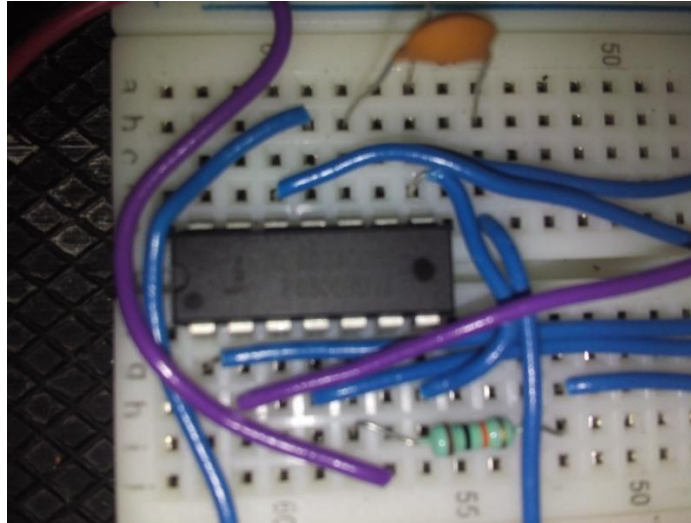


Fig.48 integrado ICL 8038 pruebas en protoboard.

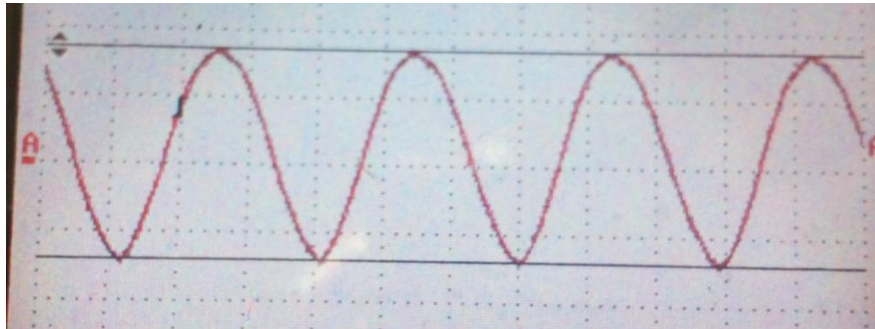


Fig.49 Forma de onda senoidal.

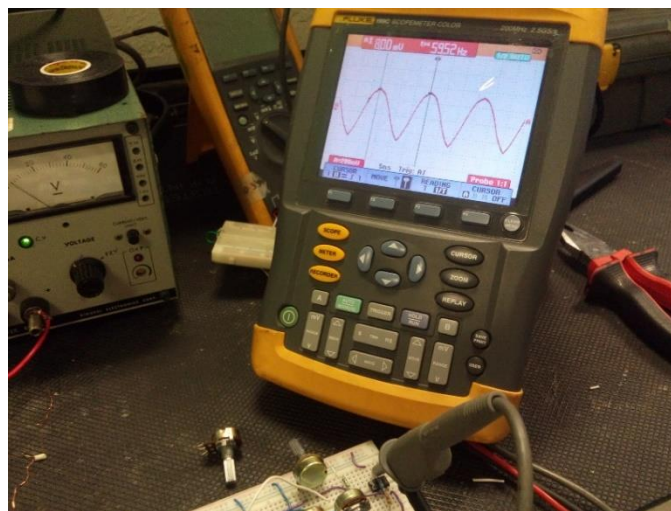


Fig.50 Circuito operando con 59.52 Hz.

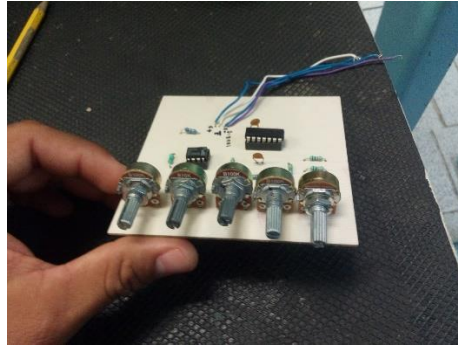


Fig.51 Circuito simulador

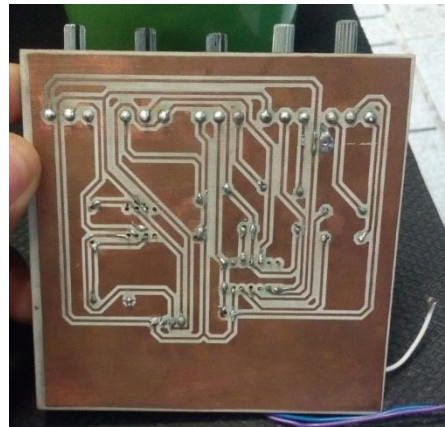


Fig.52 Pista Circuito simulador

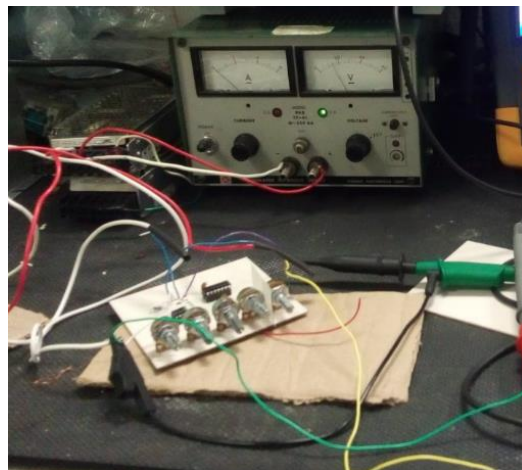


Fig.53 Circuito simulador operando.



Fig.54 Desfase entre simulador a (red) y simulador b (generador).



Fig.55 Señales próximas a sincronizar.

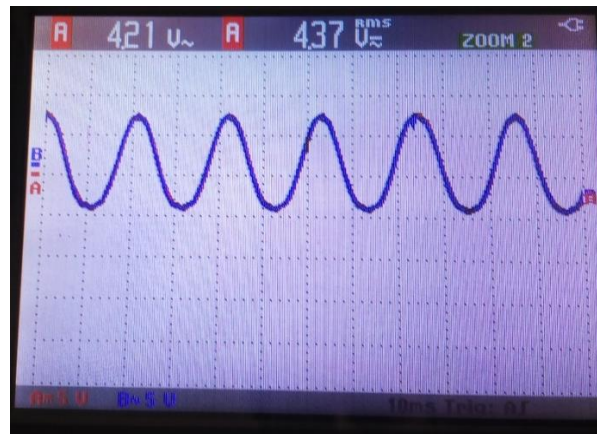


Fig.56 Señal a y b sincronizadas.

CAPÍTULO

VI

6.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.1 CONCLUSION

Durante el periodo que realice mi residencia pude ser testigo de la importancia que tiene la sincronización de los generadores en una central hidroeléctrica.

- ✓ Secuencia de fase
- ✓ Ajuste de frecuencia
- ✓ Ajuste de tensión

Estos parámetros deben de ser lo iguales o similares para poder sincronizar el generador a la red.

Con este proyecto se buscó que el personal de operación observara y comprendiera de forma técnica y gráfica el proceso de sincronización manual entre el generador con la red. Ya que como se mencionó al principio la mayoría del personal de operación ha obtenido sus conocimientos de forma empírica.

De acuerdo con los objetivos que se planteó al principio de la residencia podemos concluir que se cumplieron los objetivos en lo general. Sin embargo la sincronización se realizó por medio del osciloscopio ya que no se contó con un sincronoscopio para este proyecto.

Tanto en proteus como el circuito que se diseñó ambos coinciden en su comportamiento obteniendo los resultados esperados.

Se logró simular satisfactoriamente la señal senoidal, que oscila en valores positivos y negativos y el control manual de la frecuencia y el voltaje mediante 2 pulsadores para subir y bajar las magnitudes de voltaje u frecuencia. Con esto se logra simular las señales del comportamiento de un generador síncrono cuando es llevado al proceso de sincronización, en este caso solo vemos la salida de una fase. También puedo decir que gracias a la oportunidad que se me dio, de realizar mi residencia en la C.H. Malpaso adquirí conocimientos sobre cómo se realiza la generación de energía eléctrica.

6.1.2 RECOMENDACIONES

Debido a la importancia que genera la sincronización en una central hidroeléctrica, este proyecto puede ser mejorado creando un sincronoscopio para detectar la diferencia de fase entre un generador y la red.

REFERENCIAS

J. FRAILE MORA, "MÁQUINAS ELÉCTRICAS", 2003.

FIDEL FERNÁNDEZ, "GUIA DOCENTE GENERADOR SÍNCRONO", 2013.

BHAG S.GURU HÜSEYIN R. HIZIROGLU, "MÁQUINAS ELÉCTRICAS Y TRANSFORMADORES", TERCERA EDICIÓN.

MÁQUINAS ELÉCTRICAS. "GUIÓN PRÁCTICAS LABORATORIO ICAI"

<https://www.andritz.com/hy-neptun-syn-es.pdf>

https://library.e.abb.com/public/3d59f8698a56ed4ec12577c7003a1b1d/3BHT490301_S01_C_O.pdf

http://campus.fi.uba.ar/pluginfile.php/111883/mod_resource/content/1/10%20M%C3%A1quina%20Sincr%C3%B3nica.pdf

https://library.e.abb.com/public/7949b5769c8a8b5748257810001bbec5/AMG_0180_0400_User%20Manual_ES_C%20.pdf

ANEXOS

Para el diseño del circuito se utilizó el programa proteus en las siguientes imágenes se puede apreciar la construcción de la pista para nuestro circuito

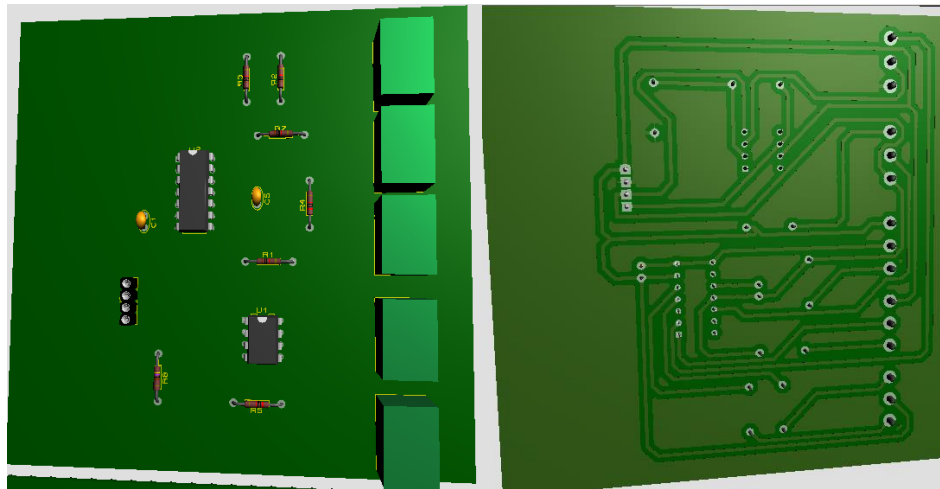


Fig.58 Diseño de placa para integrado icl8038

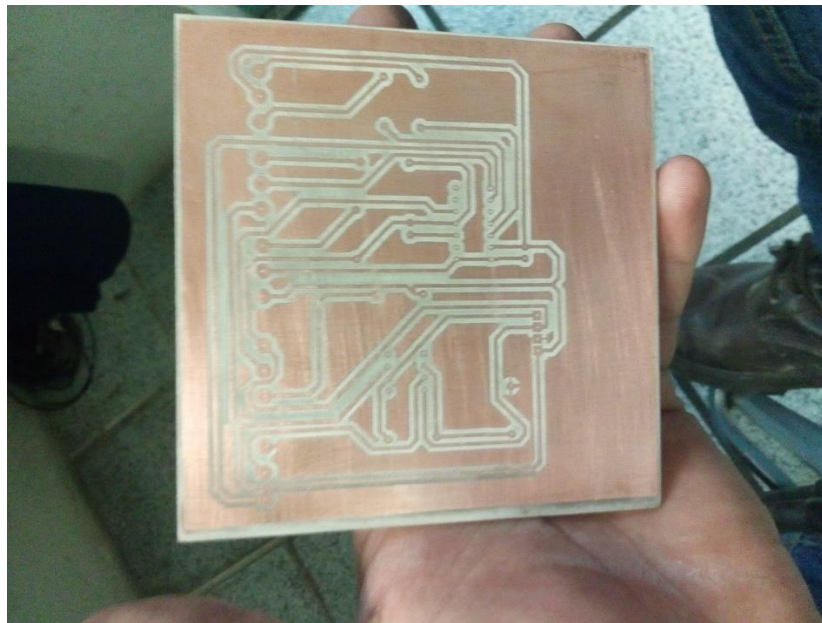


Fig.59 Pistas del circuito generador de señal senoidal

Para medir la frecuencia se utilizó una placa arduino uno, pero para poder hacerlo se tuvo que hacer un arreglo utilizando un amplificador operacional con una configuración de tipo detector por cero y unos diodos para ajustar el voltaje de salida y no dañar la entrada del arduino

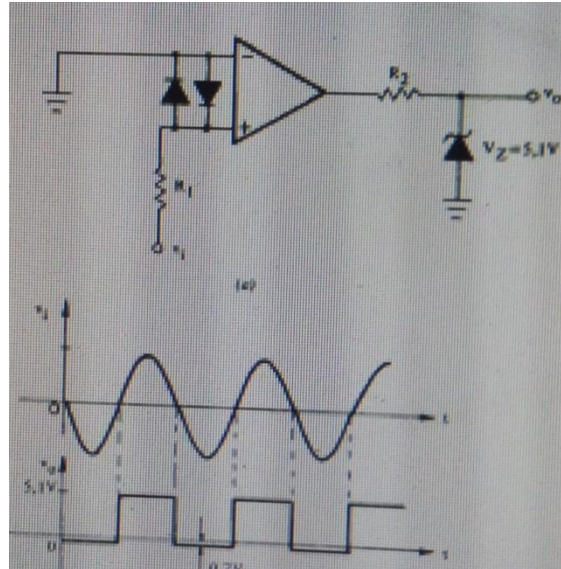


Fig.60 Detector de cruce por cero



Fig.61 Detector de cruce por cero



Fig.62 Salida del amplificador operacional

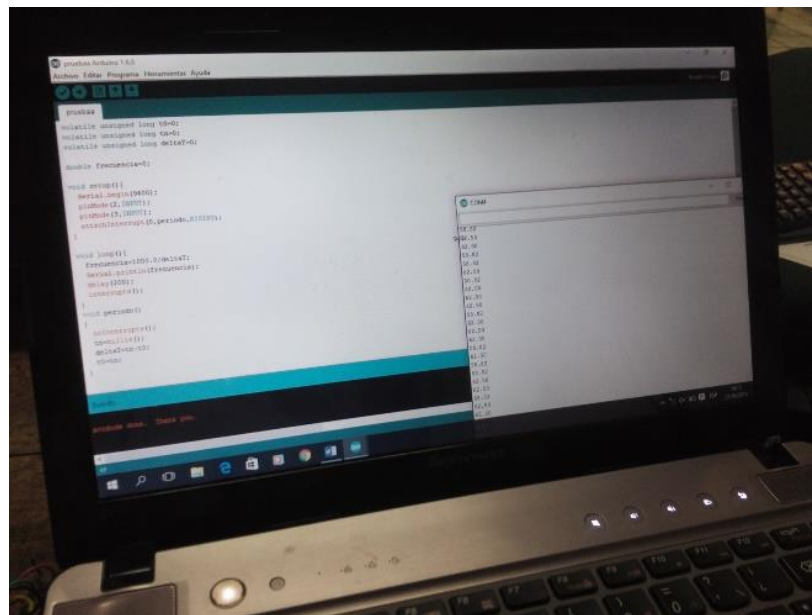


Fig.63 Programa arduino midiendo frecuencia

Código 1 frecuencímetro

```
volatile unsigned long t0 = 0;
volatile unsigned long t0 = 0;

volatile unsigned long tn = 0;

volatile unsigned long deltaT = 0;

double frecuencia = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(2,INPUT);
  pinMode(3,INPUT);
  attachInterrupt(0, periodo, RISING);
}

void loop() {
  frecuencia=1000.0/deltaT;
  Serial.println(frecuencia);
  delay(200);
  interrupts();
}

void periodo()
{
  noInterrupts();
  tn=millis();
  deltaT=tn-t0;
  t0=tn;
}
```

Código 2 frecuencímetro

```
#include <FreqCount.h>

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  FreqCount.begin(1000);
}

void loop() {
  if (FreqCount.available()) {
    unsigned long count = FreqCount.read();
    Serial.println(count);
  }
}
```



Fig.64 Tablero de sincronización

La imagen interior muestra un tablero de sincronización antiguo que se utilizaba para hacer la sincronización manual por medio de lámparas se observa 2 frecuencímetros y 2 voltímetros.

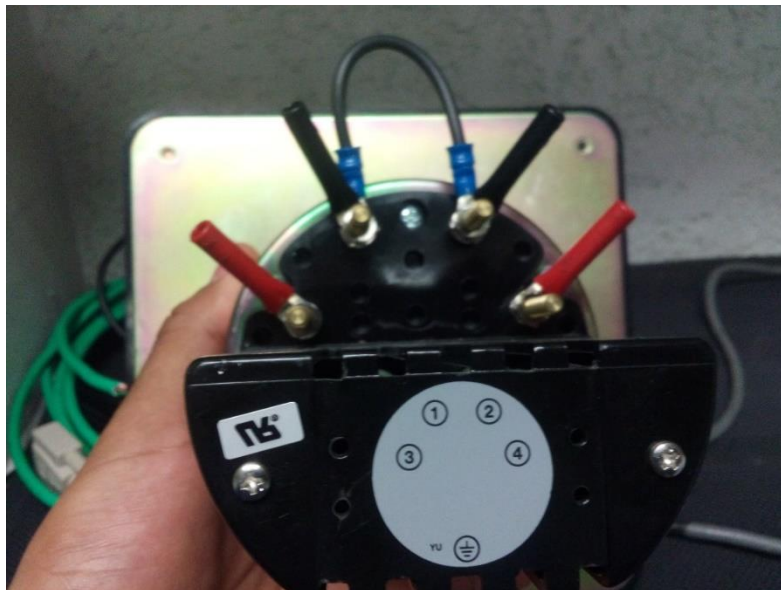


Fig.65 Sincronoscopio Yokogawa AB16 120v 60hz

La siguiente imagen muestra la simulación en el programa Labview del comportamiento del sincrosocopio donde el generador tiene una frecuencia ligeramente alta comparada con la frecuencia de la red por lo tanto se puede apreciar cómo va adelantada la frecuencia y el defase entre estas dos señales es de $73,87^\circ$

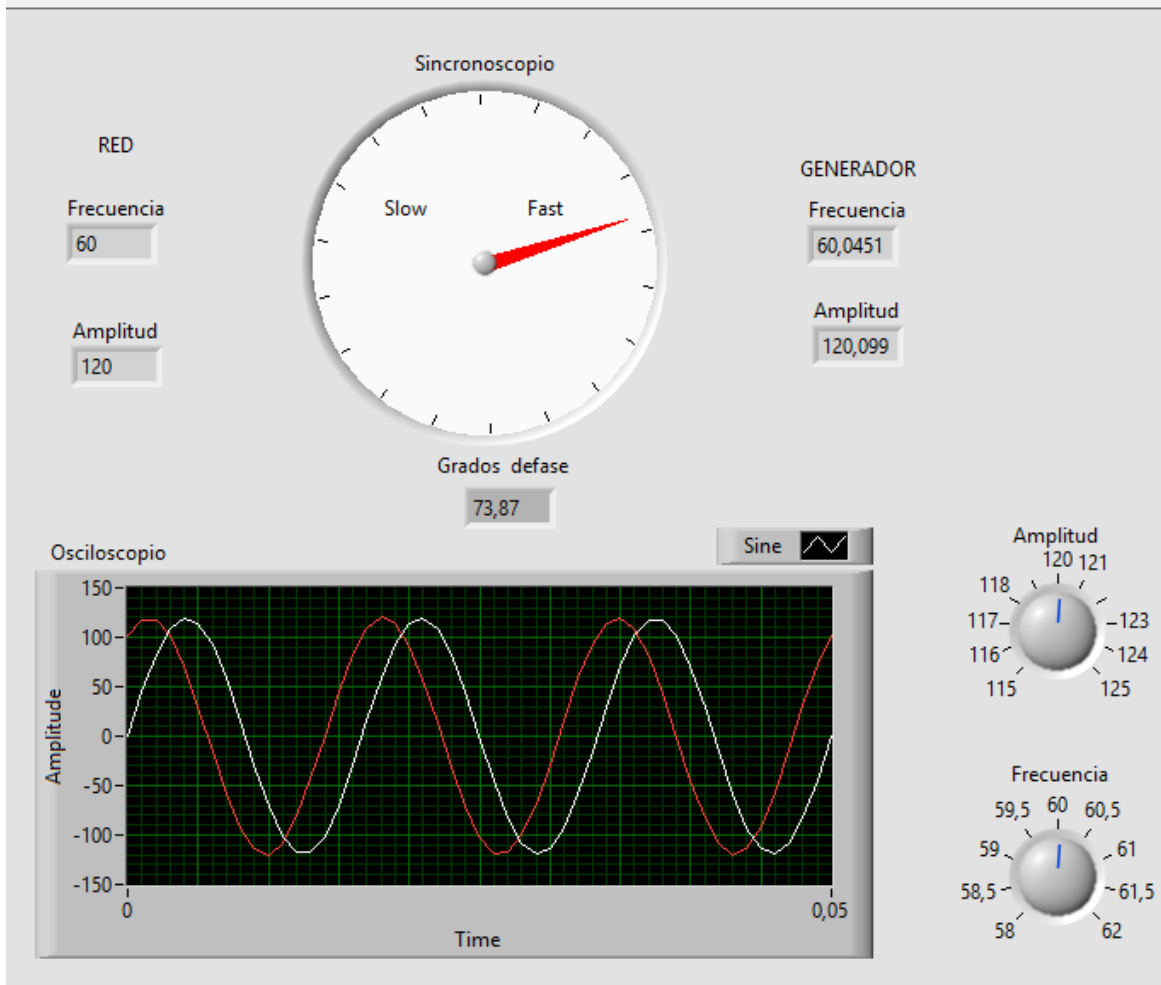


Fig.66 Frecuencia de generador más alta que la red

En la siguiente imagen podemos ver que la diferencia es de $315,20^\circ$ del generador con respecto a la red por lo consiguiente se ve que la aguja del sincronoscopio gira en sentido anti horario.

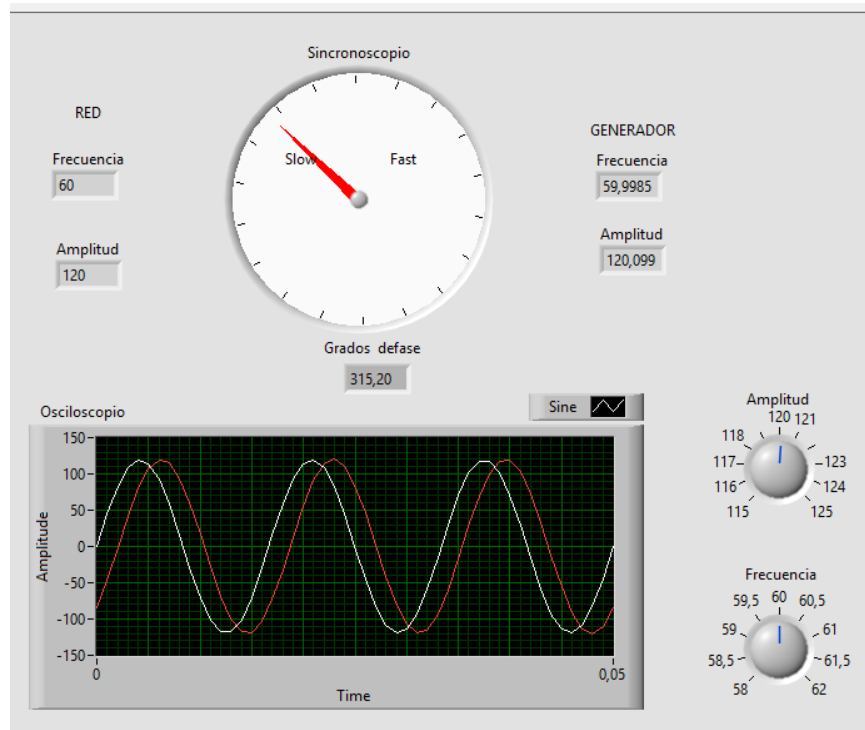


Fig.67 Frecuencia de generador más baja que la red

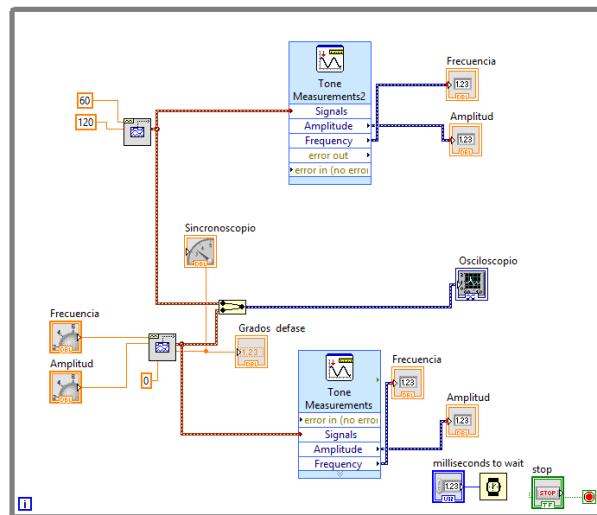


Fig.68 Diagrama bloques del simulador de sincronización

También se utilizó una placa arduino uno como tarjeta de adquisición de datos para observar el proceso de sincronización la siguiente imagen muestra un generador de señales cuya salida está conectada al osciloscopio y al arduino.

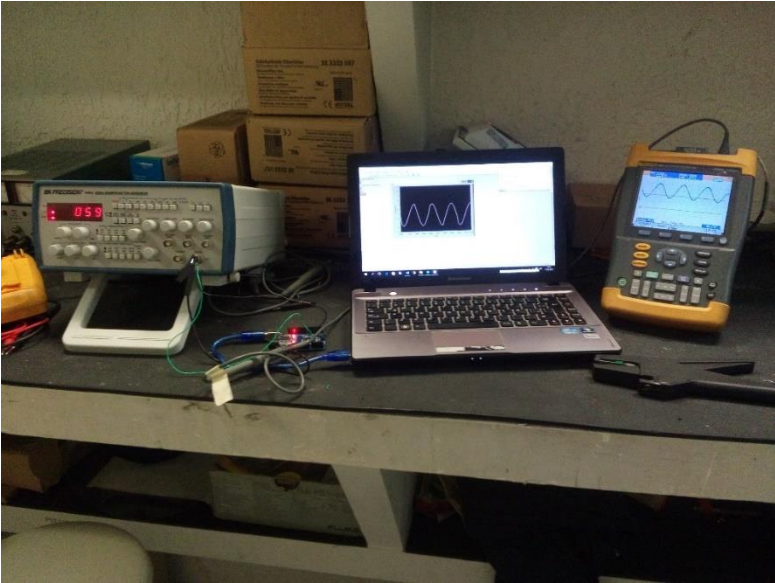


Fig.69 Arduino uno utilizado como tarjeta de adquisición de datos

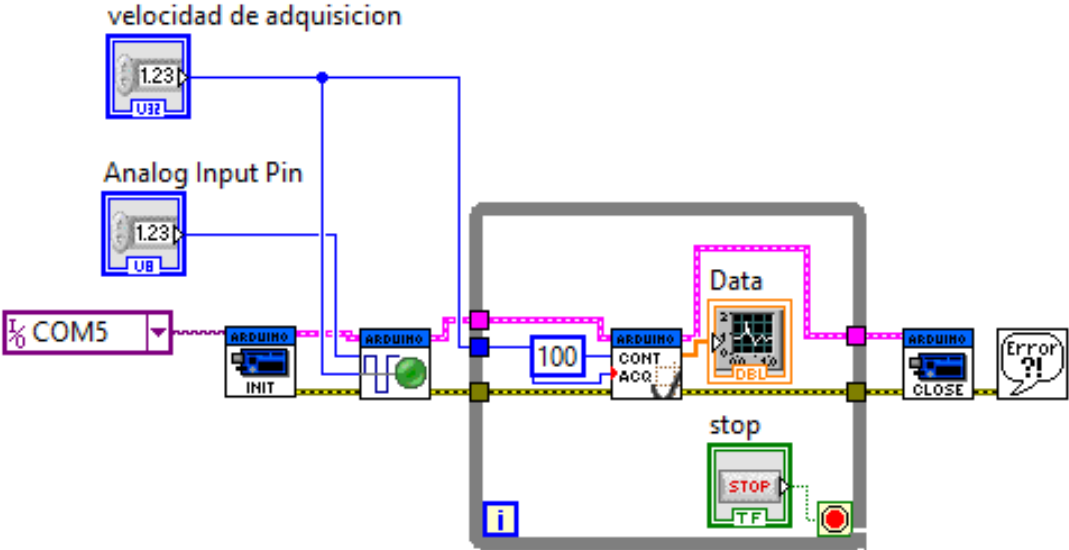


Fig.70 Diagrama bloques Labview utilizando arduino

Precision Waveform Generator/Voltage Controlled Oscillator

The ICL8038 waveform generator is a monolithic integrated circuit capable of producing high accuracy sine, square, triangular, sawtooth and pulse waveforms with a minimum of external components. The frequency (or repetition rate) can be selected externally from 0.001Hz to more than 300kHz using either resistors or capacitors, and frequency modulation and sweeping can be accomplished with an external voltage. The ICL8038 is fabricated with advanced monolithic technology, using Schottky barrier diodes and thin film resistors, and the output is stable over a wide range of temperature and supply variations. These devices may be interfaced with phase locked loop circuitry to reduce temperature drift to less than 250ppm/°C.

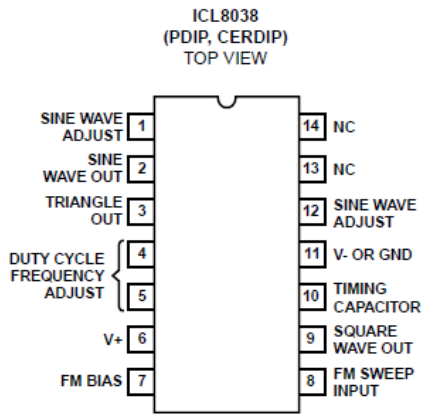
Features

- Low Frequency Drift with Temperature 250ppm/°C
- Low Distortion 1% (Sine Wave Output)
- High Linearity 0.1% (Triangle Wave Output)
- Wide Frequency Range 0.001Hz to 300kHz
- Variable Duty Cycle 2% to 98%
- High Level Outputs TTL to 28V
- Simultaneous Sine, Square, and Triangle Wave Outputs
- Easy to Use - Just a Handful of External Components Required

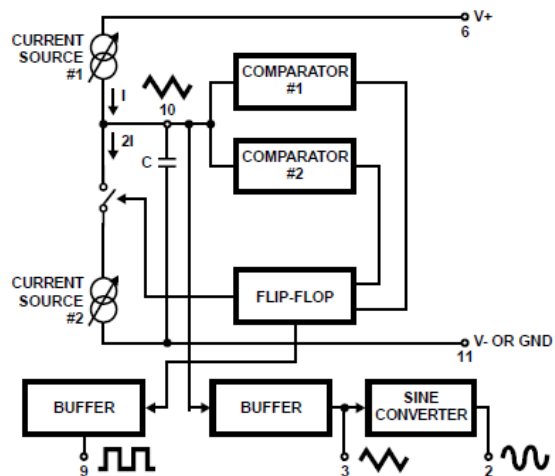
Ordering Information

PART NUMBER	STABILITY	TEMP. RANGE (°C)	PACKAGE	PKG. NO.
ICL8038CCPD	250ppm/°C (Typ)	0 to 70	14 Ld PDIP	E14.3
ICL8038CCJD	250ppm/°C (Typ)	0 to 70	14 Ld CERDIP	F14.3
ICL8038BCJD	180ppm/°C (Typ)	0 to 70	14 Ld CERDIP	F14.3
ICL8038ACJD	120ppm/°C (Typ)	0 to 70	14 Ld CERDIP	F14.3

Pinout



Functional Diagram



Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage (V- to V+)	36V
Input Voltage (Any Pin)	V- to V+
Input Current (Pins 4 and 5)	25mA
Output Sink Current (Pins 3 and 9)	25mA

Operating Conditions

Temperature Range	0°C to 70°C
ICL8038AC, ICL8038BC, ICL8038CC	0°C to 70°C

Thermal Information

Thermal Resistance (Typical, Note 1)	θ_{JA} (°C/W)	θ_{JC} (°C/W)
CERDIP Package	75	20
PDIP Package	115	N/A
Maximum Junction Temperature (Ceramic Package)	175°C	
Maximum Junction Temperature (Plastic Package)	150°C	
Maximum Storage Temperature Range	-65°C to 150°C	
Maximum Lead Temperature (Soldering 10s)	300°C	

Die Characteristics

Back Side Potential	V-
---------------------	----

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

NOTE:

- θ_{JA} is measured with the component mounted on an evaluation PC board in free air.

Electrical Specifications $V_{SUPPLY} = \pm 10V$ or $+20V$, $T_A = 25^\circ C$, $R_L = 10k\Omega$, Test Circuit Unless Otherwise Specified

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	ICL8038CC			ICL8038BC			ICL8038AC			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Supply Voltage Operating Range	V_{SUPPLY} V+	Single Supply	+10	-	+30	+10	-	+30	+10	-	+30	V
	V+, V-	Dual Supplies	± 5	-	± 15	± 5	-	± 15	± 5	-	± 15	V
Supply Current	I_{SUPPLY}	$V_{SUPPLY} = \pm 10V$ (Note 2)		12	20	-	12	20	-	12	20	mA
FREQUENCY CHARACTERISTICS (All Waveforms)												
Max. Frequency of Oscillation	f_{MAX}		100	-	-	100	-	-	100	-	-	kHz
Sweep Frequency of FM Input	f_{SWEEP}		-	10	-	-	10	-	-	10	-	kHz
Sweep FM Range		(Note 3)	-	35:1	-	-	35:1	-	-	35:1	-	
FM Linearity		10:1 Ratio	-	0.5	-	-	0.2	-	-	0.2	-	%
Frequency Drift with Temperature (Note 5)	$\Delta f/\Delta T$	0°C to 70°C	-	250	-	-	180	-	-	120	-	ppm/°C
Frequency Drift with Supply Voltage	$\Delta f/\Delta V$	Over Supply Voltage Range	-	0.05	-	-	0.05	-	-	0.05	-	%/V
OUTPUT CHARACTERISTICS												
Square Wave												
Leakage Current	I_{OLK}	$V_9 = 30V$	-	-	1	-	-	1	-	-	1	μA
Saturation Voltage	V_{SAT}	$I_{SINK} = 2mA$	-	0.2	0.5	-	0.2	0.4	-	0.2	0.4	V
Rise Time	t_R	$R_L = 4.7k\Omega$	-	180	-	-	180	-	-	180	-	ns
Fall Time	t_F	$R_L = 4.7k\Omega$	-	40	-	-	40	-	-	40	-	ns
Typical Duty Cycle Adjust (Note 6)	ΔD		2		98	2	-	98	2	-	98	%
Triangle/Sawtooth/Ramp												
Amplitude	$V_{TRIANGLE}$	$R_{TRI} = 100k\Omega$	0.30	0.33	-	0.30	0.33	-	0.30	0.33	-	$\times V_{SUPPLY}$
Linearity			-	0.1	-	-	0.05	-	-	0.05	-	%
Output Impedance	Z_{OUT}	$I_{OUT} = 5mA$	-	200	-	-	200	-	-	200	-	Ω

Electrical Specifications $V_{SUPPLY} = \pm 10V$ or $+20V$, $T_A = 25^\circ C$, $R_L = 10k\Omega$, Test Circuit Unless Otherwise Specified (Continued)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	ICL8038CC			ICL8038BC			ICL8038AC			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Sine Wave												
Amplitude	V_{SINE}	$R_{SINE} = 100k\Omega$	0.2	0.22	-	0.2	0.22	-	0.2	0.22	-	$\times V_{SUPPLY}$
THD	THD	$R_S = 1M\Omega$ (Note 4)	-	2.0	5	-	1.5	3	-	1.0	1.5	%
THD Adjusted	THD	Use Figure 4	-	1.5	-	-	1.0	-	-	0.8	-	%

NOTES:

- R_A and R_B currents not included.
- $V_{SUPPLY} = 20V$; R_A and $R_B = 10k\Omega$, $f \cong 10kHz$ nominal; can be extended 1000 to 1. See Figures 5A and 5B.
- $82k\Omega$ connected between pins 11 and 12, Triangle Duty Cycle set at 50%. (Use R_A and R_B .)
- Figure 1, pins 7 and 8 connected, $V_{SUPPLY} = \pm 10V$. See Typical Curves for T.C. vs V_{SUPPLY} .
- Not tested, typical value for design purposes only.

Test Conditions

PARAMETER	R_A	R_B	R_L	C	SW_1	MEASURE
Supply Current	10k Ω	10k Ω	10k Ω	3.3nF	Closed	Current Into Pin 6
Sweep FM Range (Note 7)	10k Ω	10k Ω	10k Ω	3.3nF	Open	Frequency at Pin 9
Frequency Drift with Temperature	10k Ω	10k Ω	10k Ω	3.3nF	Closed	Frequency at Pin 3
Frequency Drift with Supply Voltage (Note 8)	10k Ω	10k Ω	10k Ω	3.3nF	Closed	Frequency at Pin 9
Output Amplitude (Note 10)						
Sine	10k Ω	10k Ω	10k Ω	3.3nF	Closed	Pk-Pk Output at Pin 2
Triangle	10k Ω	10k Ω	10k Ω	3.3nF	Closed	Pk-Pk Output at Pin 3
Leakage Current (Off) (Note 9)	10k Ω	10k Ω		3.3nF	Closed	Current into Pin 9
Saturation Voltage (On) (Note 9)	10k Ω	10k Ω		3.3nF	Closed	Output (Low) at Pin 9
Rise and Fall Times (Note 11)	10k Ω	10k Ω	4.7k Ω	3.3nF	Closed	Waveform at Pin 9
Duty Cycle Adjust (Note 11)						
Max	50k Ω	$\sim 1.6k\Omega$	10k Ω	3.3nF	Closed	Waveform at Pin 9
Min	$\sim 25k\Omega$	50k Ω	10k Ω	3.3nF	Closed	Waveform at Pin 9
Triangle Waveform Linearity	10k Ω	10k Ω	10k Ω	3.3nF	Closed	Waveform at Pin 3
Total Harmonic Distortion	10k Ω	10k Ω	10k Ω	3.3nF	Closed	Waveform at Pin 2

NOTES:

- The hi and lo frequencies can be obtained by connecting pin 8 to pin 7 (f_{HI}) and then connecting pin 8 to pin 6 (f_{LO}). Otherwise apply Sweep Voltage at pin 8 ($\frac{2}{3} V_{SUPPLY} + 2V$) $\leq V_{SWEEP} \leq V_{SUPPLY}$ where V_{SUPPLY} is the total supply voltage. In Figure 5B, pin 8 should vary between 5.3V and 10V with respect to ground.
- $10V \leq V^+ \leq 30V$, or $\pm 5V \leq V_{SUPPLY} \leq \pm 15V$.
- Oscillation can be halted by forcing pin 10 to +5V or -5V.
- Output Amplitude is tested under static conditions by forcing pin 10 to 5V then to -5V.
- Not tested; for design purposes only.

Test Circuit

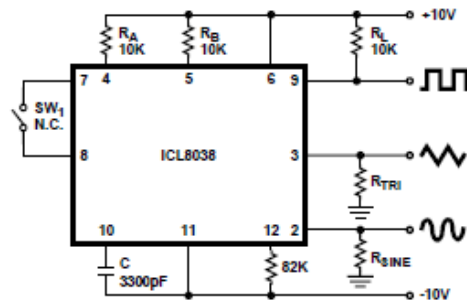
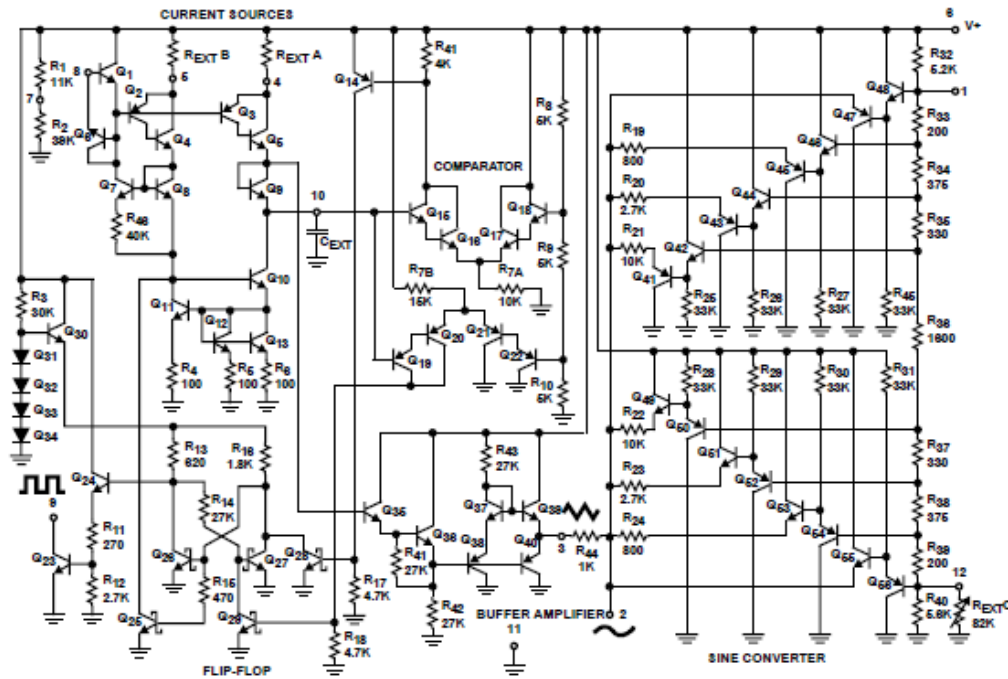


FIGURE 1. TEST CIRCUIT

Detailed Schematic



Application Information (See Functional Diagram)

An external capacitor C is charged and discharged by two current sources. Current source #2 is switched on and off by a flip-flop, while current source #1 is on continuously. Assuming that the flip-flop is in a state such that current source #2 is off, and the capacitor is charged with a current I , the voltage across the capacitor rises linearly with time. When this voltage reaches the level of comparator #1 (set at $2/3$ of the supply voltage), the flip-flop is triggered, changes states, and releases current source #2. This current source normally carries a current $2I$, thus the capacitor is discharged with a

net-current I and the voltage across it drops linearly with time. When it has reached the level of comparator #2 (set at $1/3$ of the supply voltage), the flip-flop is triggered into its original state and the cycle starts again.

Four waveforms are readily obtainable from this basic generator circuit. With the current sources set at I and $2I$ respectively, the charge and discharge times are equal. Thus a triangle waveform is created across the capacitor and the flip-flop produces a square wave. Both waveforms are fed to buffer stages and are available at pins 3 and 9.

The levels of the current sources can, however, be selected over a wide range with two external resistors. Therefore, with the two currents set at values different from I and $2I$, an asymmetrical sawtooth appears at Terminal 3 and pulses with a duty cycle from less than 1% to greater than 99% are available at Terminal 9.

The sine wave is created by feeding the triangle wave into a nonlinear network (sine converter). This network provides a decreasing shunt impedance as the potential of the triangle moves toward the two extremes.

Waveform Timing

The *symmetry* of all waveforms can be adjusted with the external timing resistors. Two possible ways to accomplish this are shown in Figure 3. Best results are obtained by keeping the timing resistors R_A and R_B separate (A). R_A controls the rising portion of the triangle and sine wave and the 1 state of the square wave.

The magnitude of the triangle waveform is set at $\frac{1}{3} V_{SUPPLY}$; therefore the rising portion of the triangle is,

$$t_1 = \frac{C \times V}{I} = \frac{C \times 1/3 \times V_{SUPPLY} \times R_A}{0.22 \times V_{SUPPLY}} = \frac{R_A \times C}{0.66}$$

The falling portion of the triangle and sine wave and the 0 state of the square wave is:

$$t_2 = \frac{C \times V}{I} = \frac{C \times 1/3 \times V_{SUPPLY}}{2(0.22) \frac{V_{SUPPLY}}{R_B} - 0.22 \frac{V_{SUPPLY}}{R_A}} = \frac{R_A R_B C}{0.66(2R_A - R_B)}$$

Thus a 50% duty cycle is achieved when $R_A = R_B$.

If the duty cycle is to be varied over a small range about 50% only, the connection shown in Figure 3B is slightly more convenient. A $1k\Omega$ potentiometer may not allow the duty cycle to be adjusted through 50% on all devices. If a 50% duty cycle is required, a $2k\Omega$ or $5k\Omega$ potentiometer should be used.

With two separate timing resistors, the frequency is given by:

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{\frac{R_A C}{0.66} \left(1 + \frac{R_B}{2R_A - R_B} \right)}$$

or, if $R_A = R_B = R$

$$f = \frac{0.33}{RC} \text{ (for Figure 3A)}$$

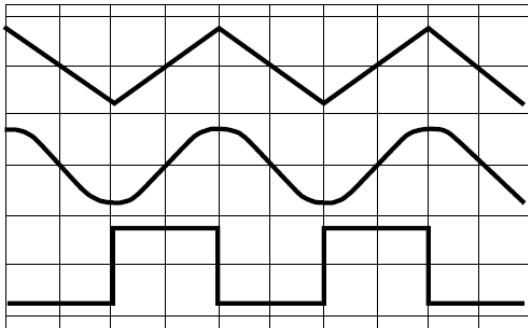


FIGURE 2A. SQUARE WAVE DUTY CYCLE - 50%

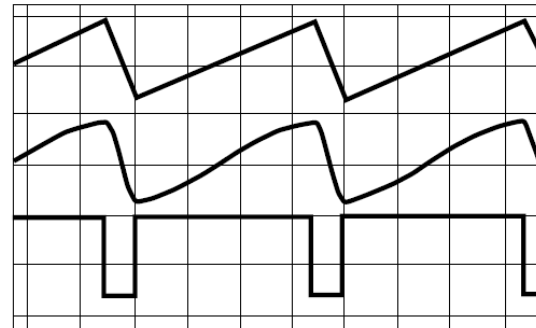


FIGURE 2B. SQUARE WAVE DUTY CYCLE - 80%

FIGURE 2. PHASE RELATIONSHIP OF WAVEFORMS

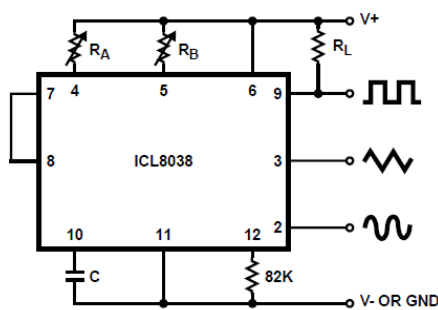


FIGURE 3A.

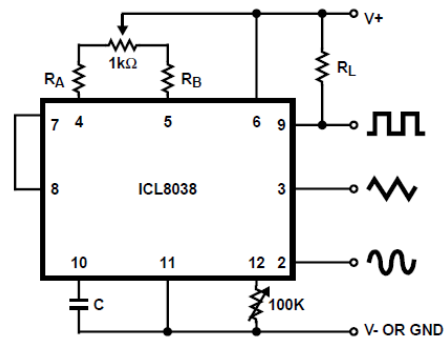


FIGURE 3B.

FIGURE 3. POSSIBLE CONNECTIONS FOR THE EXTERNAL TIMING RESISTORS

Neither time nor frequency are dependent on supply voltage, even though none of the voltages are regulated inside the integrated circuit. This is due to the fact that both currents and thresholds are direct, linear functions of the supply voltage and thus their effects cancel.

Reducing Distortion

To minimize sine wave distortion the 82kΩ resistor between pins 11 and 12 is best made variable. With this arrangement distortion of less than 1% is achievable. To reduce this even further, two potentiometers can be connected as shown in Figure 4; this configuration allows a typical reduction of sine wave distortion close to 0.5%.

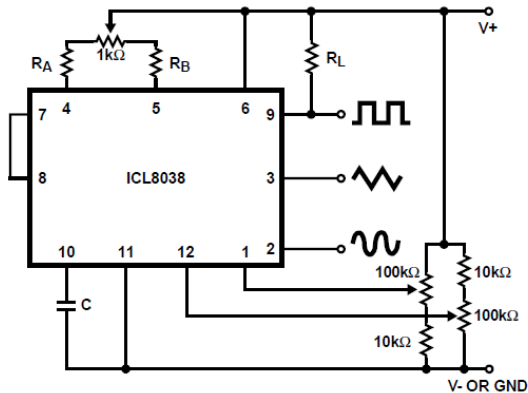


FIGURE 4. CONNECTION TO ACHIEVE MINIMUM SINE WAVE DISTORTION

Selecting R_A , R_B and C

For any given output frequency, there is a wide range of RC combinations that will work, however certain constraints are placed upon the magnitude of the charging current for optimum performance. At the low end, currents of less than 1μA are undesirable because circuit leakages will contribute significant errors at high temperatures. At higher currents ($I > 5\text{mA}$), transistor betas and saturation voltages will contribute increasingly larger errors. Optimum performance will, therefore, be obtained with charging currents of 10μA to 1mA. If pins 7 and 8 are shorted together, the magnitude of the charging current due to R_A can be calculated from:

$$I = \frac{R_1 \times (V^+ - V^-)}{(R_1 + R_2)} \times \frac{1}{R_A} = \frac{0.22(V^+ - V^-)}{R_A}$$

R_1 and R_2 are shown in the Detailed Schematic.

A similar calculation holds for R_B .

The capacitor value should be chosen at the upper end of its possible range.

Waveform Out Level Control and Power Supplies

The waveform generator can be operated either from a single power supply (10V to 30V) or a dual power supply ($\pm 5\text{V}$ to $\pm 15\text{V}$). With a single power supply the average levels of the triangle and sine wave are at exactly one-half of the supply voltage, while the square wave alternates between V^+ and ground. A split power supply has the advantage that all waveforms move symmetrically about ground.

The square wave output is not committed. A load resistor can be connected to a different power supply, as long as the applied voltage remains within the breakdown capability of the waveform generator (30V). In this way, the square wave output can be made TTL compatible (load resistor connected to +5V) while the waveform generator itself is powered from a much higher voltage.

Frequency Modulation and Sweeping

The frequency of the waveform generator is a direct function of the DC voltage at Terminal 8 (measured from V^+). By altering this voltage, frequency modulation is performed. For small deviations (e.g. $\pm 10\%$) the modulating signal can be applied directly to pin 8, merely providing DC decoupling with a capacitor as shown in Figure 5A. An external resistor between pins 7 and 8 is not necessary, but it can be used to increase input impedance from about 8kΩ (pins 7 and 8 connected together), to about $(R + 8\text{k}\Omega)$.

For larger FM deviations or for frequency sweeping, the modulating signal is applied between the positive supply voltage and pin 8 (Figure 5B). In this way the entire bias for the current sources is created by the modulating signal, and a very large (e.g. 1000:1) sweep range is created ($f = 0$ at $V_{\text{SWEEP}} = 0$). Care must be taken, however, to regulate the supply voltage; in this configuration the charge current is no longer a function of the supply voltage (yet the trigger thresholds still are) and thus the frequency becomes dependent on the supply voltage. The potential on Pin 8 may be swept down from V^+ by $(1/3 V_{\text{SUPPLY}} - 2V)$.

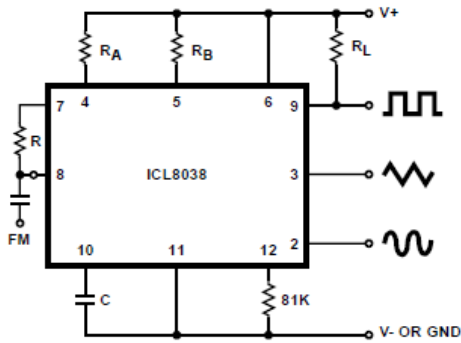


FIGURE 5A. CONNECTIONS FOR FREQUENCY MODULATION

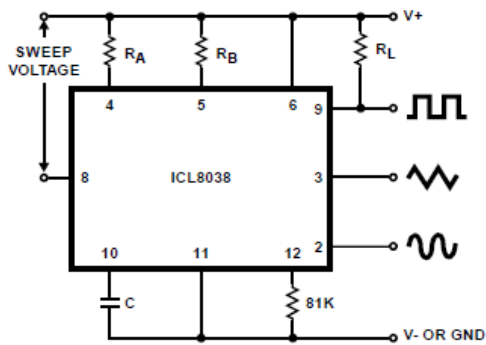


FIGURE 5B. CONNECTIONS FOR FREQUENCY SWEEP
FIGURE 5.

Typical Applications

The sine wave output has a relatively high output impedance ($1k\Omega$ Typ). The circuit of Figure 6 provides buffering, gain and amplitude adjustment. A simple op amp follower could also be used.

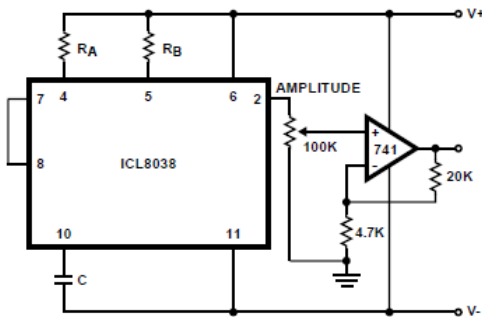


FIGURE 6. SINE WAVE OUTPUT BUFFER AMPLIFIERS

With a dual supply voltage the external capacitor on Pin 10 can be shorted to ground to halt the ICL8038 oscillation. Figure 7 shows a FET switch, diode ANDED with an input strobe signal to allow the output to always start on the same slope.

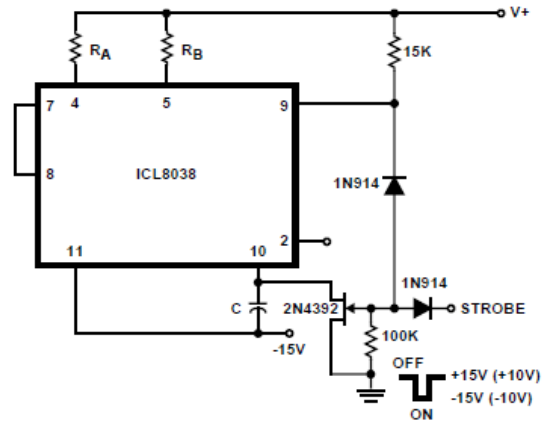


FIGURE 7. STROBE TONE BURST GENERATOR

To obtain a 1000:1 Sweep Range on the ICL8038 the voltage across external resistors R_A and R_B must decrease to nearly zero. This requires that the highest voltage on control Pin 8 exceed the voltage at the top of R_A and R_B by a few hundred mV. The Circuit of Figure 8 achieves this by using a diode to lower the effective supply voltage on the ICL8038. The large resistor on pin 5 helps reduce duty cycle variations with sweep.

The linearity of input sweep voltage versus output frequency can be significantly improved by using an op amp as shown in Figure 10.

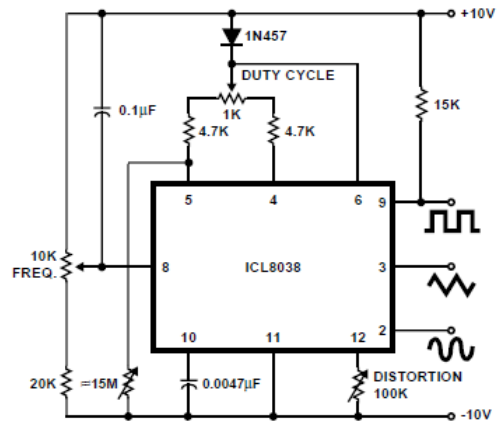


FIGURE 8. VARIABLE AUDIO OSCILLATOR, 20Hz TO 20kHz

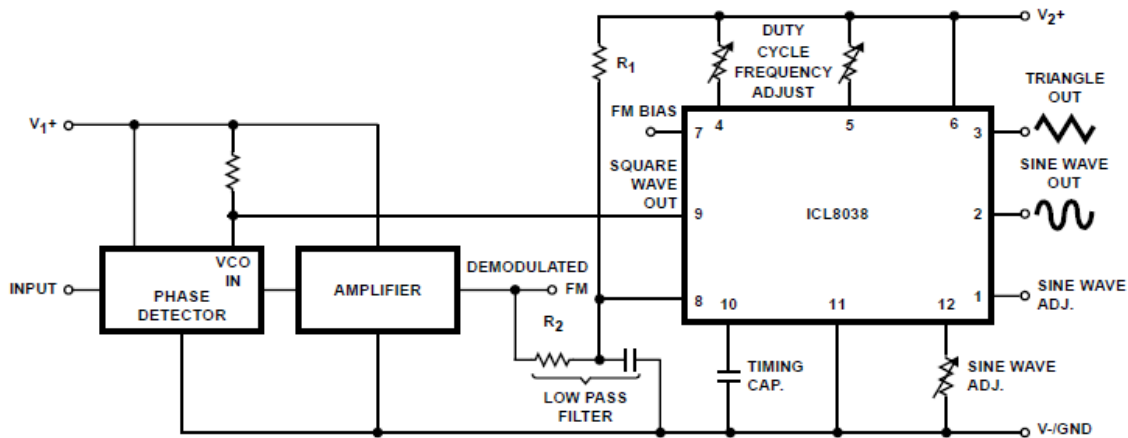


FIGURE 9. WAVEFORM GENERATOR USED AS STABLE VCO IN A PHASE-LOCKED LOOP

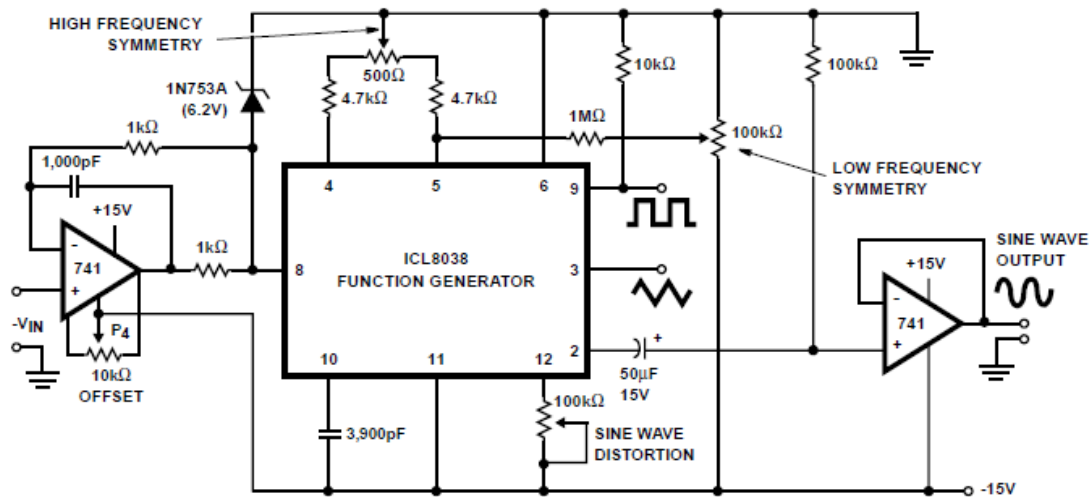


FIGURE 10. LINEAR VOLTAGE CONTROLLED OSCILLATOR

Use in Phase Locked Loops

Its high frequency stability makes the ICL8038 an ideal building block for a phase locked loop as shown in Figure 9. In this application the remaining functional blocks, the phase detector and the amplifier, can be formed by a number of available ICs (e.g., MC4344, NE562).

In order to match these building blocks to each other, two steps must be taken. First, two different supply voltages are used and the square wave output is returned to the supply of the phase detector. This assures that the VCO input voltage will not exceed the capabilities of the phase detector. If a smaller VCO signal is required, a simple resistive voltage divider is connected between pin 9 of the waveform generator and the VCO input of the phase detector.

Second, the DC output level of the amplifier must be made compatible to the DC level required at the FM input of the waveform generator (pin 8, 0.8V+). The simplest solution here is to provide a voltage divider to V_+ (R_1 , R_2 as shown) if the amplifier has a lower output level, or to ground if its level is higher. The divider can be made part of the low-pass filter.

This application not only provides for a free-running frequency with very low temperature drift, but is also has the unique feature of producing a large reconstituted sinewave signal with a frequency identical to that at the input.

For further information, see Harris Application Note AN013, "Everything You Always Wanted to Know About the ICL8038".

Definition of Terms

Supply Voltage (V_{SUPPLY}). The total supply voltage from $V+$ to $V-$.

Supply Current. The supply current required from the power supply to operate the device, excluding load currents and the currents through R_A and R_B .

Frequency Range. The frequency range at the square wave output through which circuit operation is guaranteed.

Sweep FM Range. The ratio of maximum frequency to minimum frequency which can be obtained by applying a sweep voltage to pin 8. For correct operation, the sweep voltage should be within the range:

$$(\frac{2}{3} V_{SUPPLY} + 2V) < V_{SWEEP} < V_{SUPPLY}$$

FM Linearity. The percentage deviation from the best fit straight line on the control voltage versus output frequency curve.

Output Amplitude. The peak-to-peak signal amplitude appearing at the outputs.

Saturation Voltage. The output voltage at the collector of Q_{23} when this transistor is turned on. It is measured for a sink current of 2mA.

Rise and Fall Times. The time required for the square wave output to change from 10% to 90%, or 90% to 10%, of its final value.

Triangle Waveform Linearity. The percentage deviation from the best fit straight line on the rising and falling triangle waveform.

Total Harmonic Distortion. The total harmonic distortion at the sine wave output.

Typical Performance Curves

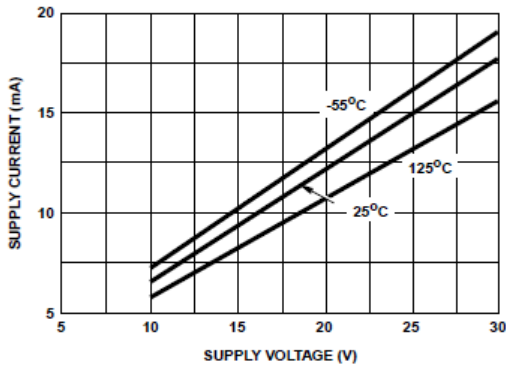


FIGURE 11. SUPPLY CURRENT vs SUPPLY VOLTAGE

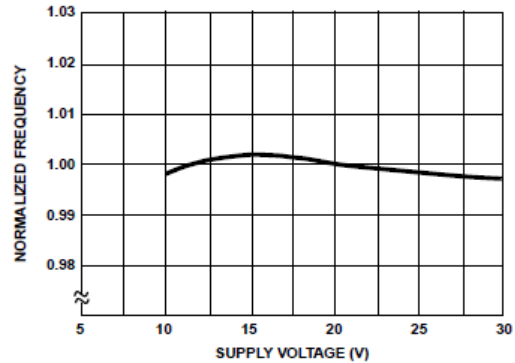


FIGURE 12. FREQUENCY vs SUPPLY VOLTAGE

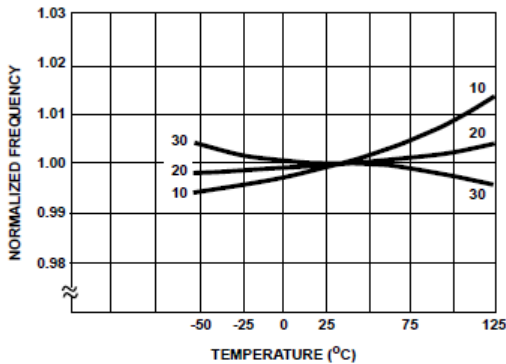


FIGURE 13. FREQUENCY vs TEMPERATURE

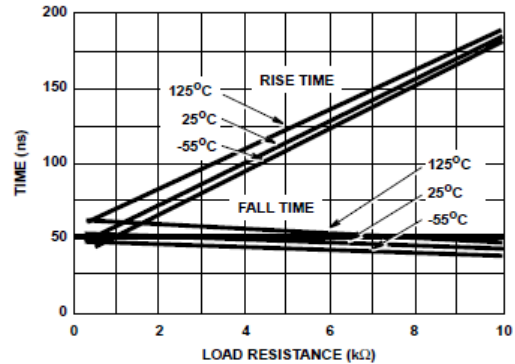


FIGURE 14. SQUARE WAVE OUTPUT RISE/FALL TIME vs LOAD RESISTANCE

Typical Performance Curves (Continued)

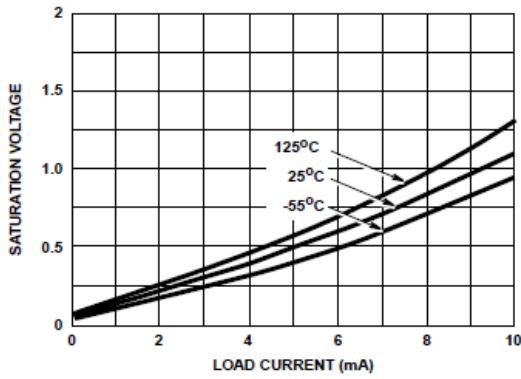


FIGURE 15. SQUARE WAVE SATURATION VOLTAGE vs LOAD CURRENT

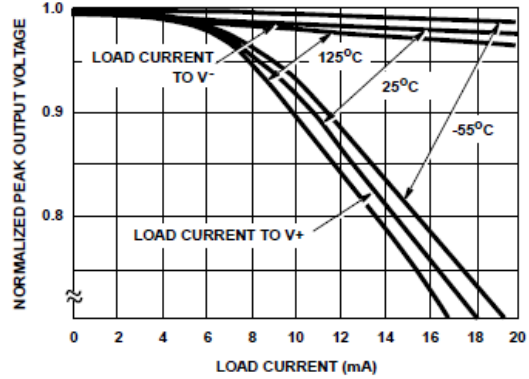


FIGURE 16. TRIANGLE WAVE OUTPUT VOLTAGE vs LOAD CURRENT

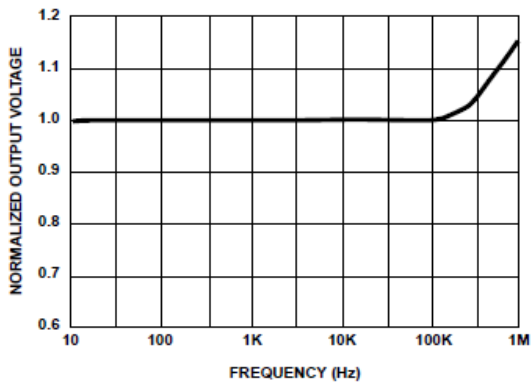


FIGURE 17. TRIANGLE WAVE OUTPUT VOLTAGE vs FREQUENCY

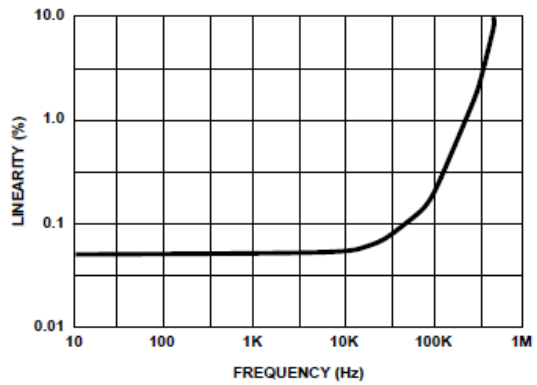


FIGURE 18. TRIANGLE WAVE LINEARITY vs FREQUENCY

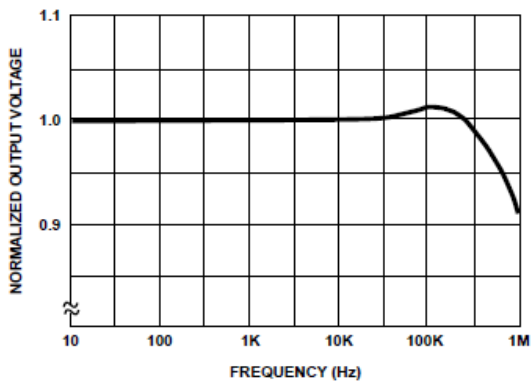


FIGURE 19. SINE WAVE OUTPUT VOLTAGE vs FREQUENCY

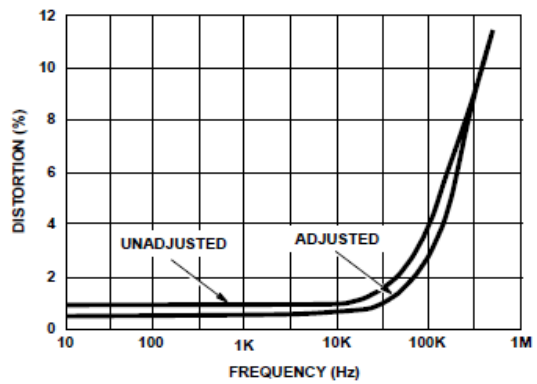


FIGURE 20. SINE WAVE DISTORTION vs FREQUENCY