



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

"ARAGON"

23  
24

*ANALISIS OPERATIVO DE UN SISTEMA  
HIBRIDO EFD*

**TESIS PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

**P R E S E N T A :**

**LUIS FELIPE GOMEZ ROSALES**



MEXICO, D. F.

1000

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A mis padres  
Felipe de Jesús y María de Jesús...*

***Doy mi entero reconocimiento y gratitud:***

***A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser la base de mi formación profesional y darme la oportunidad de realizar mis estudios a nivel licenciatura, en la Escuela Nacional de Estudios Profesionales plantel Aragón.***

***Al Instituto de Investigaciones Eléctricas de Cuernavaca por permitirme realizar mi trabajo de tesis en sus instalaciones, así como por el apoyo técnico y económico brindado durante mi estancia.***

---

## PROLOGO

---

En Nuestro país --como en la mayoría de los países del tercer mundo-- existe la necesidad de electrificar comunidades rurales que se encuentran alejadas de los sistemas de distribución convencionales.

Debido a que es impráctico y costoso introducir líneas de transmisión convencionales para alimentar cargas pequeñas, los programas de electrificación rural en los últimos 4 años, han propuesto el uso de fuentes renovables de energía para la generación de electricidad en comunidades con poca población.

Hasta años recientes, la electrificación rural era básicamente llevada a cabo por la extensión de la red eléctrica nacional, y en algunos casos con plantas electrógenas diésel. A través de este proceso, un gran porcentaje de áreas rurales con un índice poblacional de entre 500 a 2500 habitantes tienen electricidad. Sin embargo, comunidades rurales menores a 500 habitantes carecen de ésta. Además, tomando en cuenta el crecimiento de la población, se estima que para el año 2025 se requerirá una capacidad de 125,000 MW de generación eléctrica, contando en la actualidad con 30,000 MW. Esto indica que el sistema eléctrico del país debe ser transformado de un sistema centralizado a un sistema distribuido, donde la pequeña producción y la producción independiente tengan un papel importante en la producción de energía eléctrica.

Para lograrlo es necesario el uso de fuentes alternas de energía sin impactos ambientales acumulativos. Ello traerá como consecuencia una sustitución paulatina de los combustibles fósiles por el uso de energías naturales como la biomasa, eólica y solar.

En ocasiones, energías como la eólica y solar son integradas en un mismo sistema para la generación de potencia eléctrica; este tipo de sistemas son llamados sistemas híbridos. A lo largo del territorio mexicano se encuentran distribuidos 8 sistemas híbridos de muy pequeña potencia, pero existe la tendencia de incrementar el número de éstos dadas sus manifiestas ventajas en comunidades rurales aisladas.

---

## INTRODUCCION

---

El presente trabajo está basado en el análisis operativo de un Sistema Híbrido de generación eléctrica independiente de pequeña potencia. Tal sistema está constituido por un conjunto Fotovoltaico, un generador Eoloeléctrico y una planta Diesel-eléctrica, que de ahora en adelante se denominará sistema EFD.

En la actualidad, los 3 mayores sistemas híbridos a nivel nacional están localizados en los estados de Quintana Roo (X-Celex), Hidalgo (San Antonio Agua Bendita) y México (Ma. Magdalena). (Hucuz y Martínez, 1994)

Este tipo de sistema presenta ventajas con respecto a la operación individual de las diferentes fuentes que lo integran. Por ejemplo, los días nublados, las lluvias, cargas pico así como los períodos nocturnos influyen en la continuidad del sistema fotovoltaico. De manera similar, los cambios frecuentes en la velocidad del viento así como ráfagas o largos períodos sin viento afectan la operación del aerogenerador. Por otro lado, el consumo de combustible y su costoso mantenimiento son las principales desventajas del motor diesel que constituye el primotor de la planta eléctrica.

Como es evidente las energías naturales varían de acuerdo a las condiciones atmosféricas presentes, la ventaja del sistema híbrido es la de proporcionar un efecto complementario normal entre las energías eólica y solar. Se observa que en los períodos del año, específicamente en invierno, la radiación solar es notablemente menor que en el verano, mientras que la energía eólica es mayor en el invierno que en el verano. Por lo que la combinación de estas dos energías renovables con variaciones estacionales opuestas, dan un promedio estable de potencia eléctrica. Además, el mismo efecto es apreciable en la transición diaria de día a noche, ya que la velocidad del viento aumenta al atardecer y la radiación solar disminuye. Sin embargo, las condiciones atmosféricas pueden dar origen a períodos sin sol y viento, que deben tomarse en cuenta en un sistema de potencia independiente. Por tal motivo, se encuentra integrado al sistema EFD un generador eléctrico diesel. Con ello se pretende tener un sistema de suministro de potencia eléctrica confiable, continuo y autónomo.

## INTRODUCCION

---

La descripción de cada una de las fuentes generadoras de electricidad, así como su principio de operación en forma individual es tratado en los capítulos 1, 2 y 3.

El capítulo 4 presenta la arquitectura básica de un sistema híbrido así como también muestra algunas configuraciones de este sistema.

Del capítulo 5 hasta el capítulo 8 se refieren a la instalación, subsistema de control, equipo y dispositivos de protección contra sobrecorrientes y sobretensiones así como el sistema de tierras del sistema EFD.

Los modos de operación bajo condiciones normales del sistema son descritos en el capítulo 9.

El análisis de operación transitoria debido a sobrecorrientes y sobretensiones son tratados en el capítulo 10.

En el capítulo 11 se hacen algunas recomendaciones generales de seguridad para protección del personal que opera, monitorea y da mantenimiento al sistema EFD.

---

## INDICE GENERAL

---

<b>PROLOGO</b> .....	iii
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	iv
<b>CAPITULO 1 GENERACIÓN FOTOVOLTAICA</b>	
1.1. Efecto fotovoltaico .....	1
1.2. Descripción de los sistemas fotovoltaicos .....	2
1.2.1. La celda fotovoltaica .....	2
1.2.2. Conjuntos fotovoltaicos .....	3
1.2.3. Dispositivos de seguimiento .....	5
1.2.4. Diodos de bloqueo .....	6
1.2.5. Diodos de paso .....	6
<b>CAPITULO 2 GENERACIÓN EOLOELECTRICA</b>	
2.1. Descripción de un aerogenerador .....	8
2.1.1. Generador eléctrico .....	9
2.1.2. Dispositivos de regulación .....	10
2.1.3. Dispositivos de orientación .....	10
2.1.4. Rectificador de fase controlada .....	11
2.1.5. Resistencias de descarga .....	12
2.2. Principio de operación .....	12

**CAPITULO 3 GENERACION DIESEL-ELECTRICA**

3.1. Descripción de una planta electrógena .....	14
3.1.1. Motor diesel .....	15
3.1.2. Generador eléctrico .....	16
3.2. Principio de funcionamiento .....	17
3.2.1. Motor diesel .....	17
3.2.2. Generador eléctrico .....	18

**CAPITULO 4 SISTEMA HIBRIDO**

4.1. Unidad de almacenamiento .....	20
4.1.1. Batería .....	20
4.1.2. Carga y descarga .....	22
4.1.3. Factores que influyen en las baterías .....	24
4.1.4. Tipos de baterías .....	25
4.2. Unidad acondicionadora de potencia .....	26
4.2.1. Inversor .....	26
4.2.2. Controlador de carga .....	30
4.3. Arquitectura .....	33

**CAPITULO 5 INSTALACIÓN**

5.1. Conjunto fotovoltaico .....	35
5.2. Aerogenerador .....	36
5.3. Planta electrógena .....	36
5.4. Banco de baterías .....	37
5.5. Equipo electrónico .....	38
5.5.1. Controlador de carga .....	38
5.5.2. Inversor .....	38

**CAPITULO 6 CONTROL**

6.1. Descripción .....	39
6.1.1. Microprocesador .....	39
6.1.2. Memoria .....	40
6.1.3. Unidad de entrada/salida .....	40
6.1.4. Bus .....	41
6.2. Funciones del sistema de control .....	42

**CAPITULO 7 PROTECCIÓN**

7.1. Protección contra sobrecorrientes .....	43
7.1.1. Interruptores .....	44
7.1.2. Fusibles .....	44
7.1.3. Seccionalizadores .....	45
7.1.4. Coordinación .....	46
7.1.5. Ubicación .....	46
7.2. Protección contra sobretensiones .....	47
7.2.1. Apartarroyos autovalvulars de carburo de silicio (SiC) .....	48
7.2.2. Apartarroyos de óxido de zinc (ZnO) .....	48
7.2.3. Apartarroyos de gas .....	49
7.2.4. Margen de protección .....	49
7.2.5. Ubicación .....	49
7.3. Protección contra impacto directo de descargas atmosféricas .....	51

**CAPITULO 8 SISTEMA DE TIERRAS**

8.1. Funciones del sistema de tierras .....	53
8.2. Descripción del sistema de tierras .....	53
8.2.1. Malla .....	54
8.2.2. Electrodo .....	54
8.2.3. Conductores de puesta a tierra .....	55
8.3. Elementos aterrizados .....	57

**CAPITULO 9 OPERACIÓN EN ESTADO ESTABLE**

9.1. Diagrama a bloques .....	58
9.2. Modos de operación .....	59
9.2.1. Operación del inversor únicamente .....	60
9.2.2. Operación paralela del inversor y generador diesel .....	61
9.2.3. Operación paralela del inversor y generador diesel, con inversor actuando como cargador de baterías .....	65
9.3. Operación en c.d. ....	68

**CAPITULO 10 OPERACION EN ESTADO TRANSITORIO**

10.1. Transitorios debidos a sobrecorrientas .....	69
10.1.1. Arranque de motores .....	69
10.1.2. Cortocircuito en c.a. ....	71
10.1.3. Cortocircuito en c.d. ....	77
10.2. Transitorios debidos a sobretensiones .....	80
10.2.1. Sobretensiones de origen externo .....	80
10.2.2. Sobretensiones de origen interno .....	84
10.3. Ferrorresonancia .....	88
10.3.1. Ferrorresonancia serie .....	88
10.3.2. Ferrorresonancia paralelo .....	90

**CAPITULO 11 SEGURIDAD**

11.1. Recomendaciones generales de seguridad .....	91
11.2. Conexión a tierra .....	95

<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>96</b>
---------------------------	-----------

<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>99</b>
---------------------------	-----------

## **CAPITULO 1**

# **GENERACION FOTOVOLTAICA**

---

## **1. GENERACION FOTOVOLTAICA**

### **1.1. EFECTO FOTOVOLTAICO**

El efecto fotovoltaico es la base de la conversión de luz solar en energía eléctrica. Este proceso no depende del calor ya que los fotones de los rayos solares transmiten su energía directamente a los electrones sin un paso térmico intermedio.

El cristal de silicio es el material más usado en la fabricación de celdas fotovoltaicas. Cada unidad de silicio forma un arreglo tetrahedral. En su última órbita, el átomo de silicio, puede donar, aceptar o compartir 4 electrones valencia.

Cuando la luz impacta un cristal de silicio, parte de ésta es reflejada y otra absorbida. Los rayos solares absorbidos pueden alterar las propiedades eléctricas del cristal. Así, la luz de suficiente energía puede generar pares de electrón-hueco que se mueven libremente a través del silicio. Sin embargo esto no produce una corriente eléctrica útil. Se necesita construir una barrera de potencial para separar los electrones de los huecos. [Zweibel, 1984]

La barrera de potencial está formada por la unión (juntura) de material semiconductor tipo-n y tipo-p. Estos dos tipos de materiales están contaminados con pequeñas impurezas de fósforo (tipo-n) y boro (tipo-p). En la juntura de los dos materiales (el área próxima inmediata de las dos superficies) se crea un campo eléctrico que actúa como una barrera que se opone al flujo interno de cargas negativas y positivas.

Debido a la iluminación solar y a la separación de cargas existe un desbalance de cargas en la celda fotovoltaica. De tal manera que se obtendrá un flujo de corriente útil que fluirá si se conecta un circuito externo (ver figura 1.2).

## 1.2. DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Un sistema fotovoltaico está constituido por un arreglo de módulos fotovoltaicos interconectados eléctricamente para proporcionar un nivel de corriente y tensión requerido.

Los módulos fotovoltaicos, a su vez, están integrados por celdas fotovoltaicas las cuales tienen la capacidad de convertir la luz solar en electricidad.

### 1.2.1. La celda solar

La conversión directa de luz solar en energía eléctrica se realiza por medio de celdas solares. Estas están construidas con material semiconductor, debido a su efecto fotovoltaico.

La mayor cantidad de energía transmitida por los rayos solares se encuentra en el rango de la luz visible del espectro. Por tal motivo el material más utilizado en la fabricación de celdas solares es el silicio, ya que éste es sensible a la luz blanca.

Las celdas fotovoltaicas o solares actúan como generadores de corriente, sin embargo, debido a la barrera potencial, esencial para el efecto fotovoltaico, las celdas tienen la característica de un diodo en la oscuridad. La figura 1.1 a) muestra el circuito equivalente de una celda solar. Variando la resistencia de carga entre cero e infinito se obtiene la característica corriente-voltaje (I-V) de una celda típica (figura 1.1 b).

Cuando se ilumina a la celda, la curva I-V se desplaza linealmente a lo largo del eje de corriente en función de la intensidad de la luz, pudiéndose afirmar que la corriente de la celda solar es directamente proporcional a la irradiación solar. Sin embargo, la tensión varía en relación inversa a la temperatura. Por ejemplo, la tensión de las celdas cristalinas disminuye aproximadamente 0.5% por cada grado centígrado de incremento de temperatura. [Platz, 1979]

De la curva I-V (figura 1.1 b) se tienen tres puntos importantes; el punto de máxima potencia ( $I_{pm}$  y  $V_{pm}$ ), la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y la corriente de corto circuito ( $I_{cc}$ ). Los valores típicos de voltaje en circuito abierto están alrededor de 550 mV y 600 mV y las corrientes de corto circuito son de unos 30 mA/cm<sup>2</sup>. [Platz, 1979]

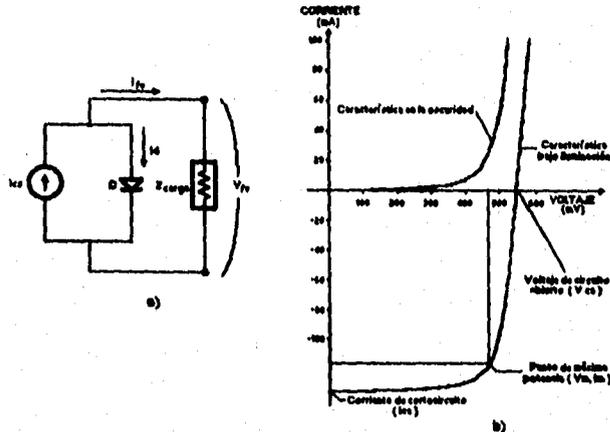


Figura 1.1: a) Circuito equivalente de una celda solar. b) Características I-V de una celda solar.

Debido a que la cantidad de potencia producida por una sola celda es relativamente pequeña, éstas deben ser conectadas en serie y paralelo para aumentar el voltaje y la corriente de salida respectivamente. Este tipo de conexiones tiene como fin formar módulos fotovoltaicos que son la unidad mínima reemplazable de un conjunto fotovoltaico, además de proporcionar un nivel útil de voltaje, corriente y potencia.

Se debe prestar atención a que las celdas que van a ser ensambladas tengan las mismas características. Como norma general, todas las celdas que van a ser conectadas en paralelo deben tener el mismo voltaje de circuito abierto y el mismo punto de máxima potencia. Las celdas para ser conectadas en serie deben tener la misma corriente de cortocircuito. Las diferentes características entre celdas producen módulos deficientes debido a que las celdas de mayor corriente y voltaje disipan su exceso de potencia en las celdas de menor característica eléctrica. (Sendia, 1990)

### 1.2.2. Conjuntos fotovoltaicos

Un módulo fotovoltaico está formado por un grupo encapsulado de celdas solares de silicio monocristalino, policristalino o amorfo, teniendo éste último un rendimiento dos o tres veces menor que el de los módulos de celdas cristalinas. Estas celdas están

contenidas en un laminado generalmente con una placa frontal de vidrio templado (ver figura 1.2.).

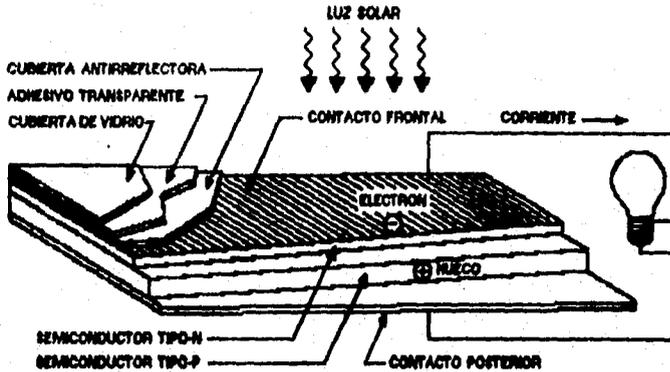


Figura 1.2 Descripción de un módulo fotovoltaico. La luz solar crea pares electrón-hueco que están separados por una juntura. Esto crea el voltaje que conduce corriente a través de un circuito externo.

Hay cuatro factores que determinan la potencia de salida de un módulo fotovoltaico: la carga conectada, la irradiación solar, la temperatura de la celda y el rendimiento de las celdas. La corriente nominal de los módulos FV es la corriente generada a  $1000 \text{ W/m}^2$  de irradiación solar a una temperatura normalizada de  $25^\circ\text{C}$ . [Sandia, 1990]

Un módulo puede ser usado individualmente para proporcionar potencia para una lámpara o para otro propósito de baja potencia. Para crear más potencia, los módulos pueden ser agrupados conectándolos en serie y/o paralelo para obtener el voltaje y la corriente deseados, desde unos watts hasta varios megawatts.

A estos grupos de módulos se le llama conjuntos fotovoltaicos y se encuentran colocados en estructuras de soporte, bases u otros componentes construidos comúnmente de aluminio, acero, hierro o madera.

Los conjuntos fotovoltaicos se componen de paneles y/o cadenas. Los paneles fotovoltaicos contienen uno o más módulos conectados en paralelo con el fin de proporcionar una corriente mayor. Las cadenas son un grupo de módulos conectados en serie para producir una tensión específica. [Weisman y Harland, 1990]

La tensión de la batería determina la tensión de funcionamiento del conjunto fotovoltaico. Generalmente se utilizan módulos de 12V en sistemas independientes.

Los conjuntos pueden estar fijos a un ángulo específico o pueden ser usados dispositivos mecánicos, denominados dispositivos de seguimiento, para orientarlos continuamente con los rayos solares.

### 1.2.3. Dispositivos de seguimiento

El sol diariamente cruza el cielo de este a oeste, y asciende o desciende por el horizonte sur (norte, en el hemisferio sur) con la sucesión de las estaciones. Para el aprovechar de manera óptima la radiación solar se utilizan dispositivos de seguimiento solar. Así que un dispositivo de seguimiento total del sol debe ser capaz de moverse en dos direcciones. Sin embargo algunos mecanismos están diseñados para moverse sólo de este a oeste y se encuentran fijos en relación a la altura solar (distancia al sol con respecto al horizonte) a un ángulo fijo que puede ser permanente o reajustado manualmente cada mes. [Zweibel, 1984]

Existen diferentes maneras para que el arreglo siga el sol. El arreglo puede rotar, o se pueden utilizar espejos que reflejen la luz siguiendo el camino de los rayos solares. Algunas veces ambos se mueven.

Hay 3 métodos empleados el se desea que el conjunto fotovoltaico siga la trayectoria del sol. El primero usa simples mecanismos constituidos por motores, engrenas y/o cadenas para mover el conjunto.

El segundo método utiliza celdas solares como sensores para orientar al conjunto. Esto se realiza colocando una celda en cada lado de un pequeño separador, montándose de la misma forma que los módulos fotovoltaicos; un dispositivo electrónico compara continuamente la corriente de ambas celdas. Si una de ellas está parcialmente cubierta por una sombra, el dispositivo activa un motor para mover al conjunto hasta que ambas corrientes sean iguales.

Estos dos métodos presentan la desventaja de consumir potencia eléctrica proveniente de los módulos para mover los motores.

El tercer método usa la expansión y contracción de fluidos para mover al conjunto. Generalmente se llena un contenedor con un fluido que se evapora y se expande considerablemente cada vez que está en contacto con la radiación solar. Bajo sombra, el fluido se condensa y se contrae. Este método de seguimiento pasivo ha demostrado ser confiable y durable, aún en situaciones con fuertes vientos.

Se recomienda usar unidades pasivas de seguimiento con un solo eje de rotación. Estas unidades no necesitan alimentación eléctrica. Las unidades de seguimiento usan un sistema de freón para seguir la posición del sol. Si son pequeñas, se pueden instalar sobre postes que soportan de 4 a 12 módulos. [Sandia, 1990]

En sistemas fijos no es necesario cambiar el ángulo de inclinación para compensar los cambios estacionales del sol. Por ejemplo, en regiones situadas a latitudes medias, se estima que un cambio del ángulo de inclinación cada 3 meses producirían un aumento de menos del 5% de energía. [Sandia, 1990]

#### 1.2.4. Diodos de bloqueo

Debido a que los módulos fotovoltaicos tienen la característica de un diodo en la oscuridad y con el fin de prevenir la descarga del banco de baterías a través del arreglo FV en períodos nocturnos, debe estar colocado un diodo entre el arreglo FV y el controlador de carga. Este diodo protege además a módulos sombreados o conexiones débiles que pueden existir en el sistema fotovoltaico.

En sistemas de 12 ó 24 volts se instala un solo diodo entre el controlador de carga y el conjunto para impedir el flujo inverso. [Sandia, 1990]

#### 1.2.5. Diodos de paso

En algunas ocasiones se recomienda colocar diodos de paso o derivación alrededor de los módulos conectados en serie permitiendo el paso de la corriente e impidiendo que el módulo bajo sombra disipe grandes cantidades de energía a través de él. [Sandia, 1990]

## **CAPITULO 2**

# **GENERACION EOLOELECTRICA**

---

### **2. GENERACION EOLOELECTRICA**

Las máquinas eólicas se clasifican en dos categorías: las máquinas de eje horizontal y las de eje vertical.

Las máquinas de eje horizontal consisten en un número variable de aspas sujetas a una flecha horizontal de tal forma que las aspas giren en dirección perpendicular al viento. Dichas aspas están colocadas de tal forma que se tenga un ángulo entre éstas y la dirección del viento (ángulo de ataque). (La Gouraérés, 1983)

Entre las máquinas de eje horizontal se pueden distinguir:

- Los molinos de viento.
- Las eólicas lentas.
- Las eólicas rápidas.

Las máquinas eólicas que se utilizan para la producción de energía eléctrica son del tipo rápidas de dos o tres aspas. Estas son utilizadas por varias razones, las principales son:

- Son más ligeras y económicas.
- Giran más rápido, por lo que el multiplicador de velocidad a utilizar para el arrastre del generador eléctrico, podrá presentar una relación de multiplicación más baja y será más ligero. En ciertos casos, podrá suprimirse.
- El par de arranque de las eólicas rápidas es capaz de arrastrar las aspas y al generador eléctrico.

De acuerdo con la capacidad de producción de energía eléctrica, los aerogeneradores pueden clasificarse en:

- Paquños.- Hasta 50 kW.
- Medianos.- De 50 a 500 kW.
- Grandes.- De 500 kW en adelante.

### 2.1. DESCRIPCION DE UN AEROGENERADOR

Un aerogenerador es un sistema conversor electromecánico que emplea la energía eólica para la generación de electricidad. Está integrado por los siguientes componentes principales:

- Rotor.- Es un turbina cuya función principal es convertir la energía cinética del viento a energía mecánica. Esta formado por un conjunto de aspas de perfil aerodinámico, cuyo número y tamaño puede variar. Generalmente son construidas con fibra de vidrio, aluminio, madera epóxica o acero. Las aspas se unen en el centro del rotor y se acoplan a una flecha.

En las aspas se pueden localizar frenos aerodinámicos que reducen la velocidad del rotor cuando se presentan vientos fuertes.

- Caja de transmisión.- Generalmente son engranas o polioplastos que aumentan la velocidad angular del rotor a la velocidad de operación angular nominal de los generadores eléctricos.
- Frenos mecánicos.- Son accionados por un mecanismo hidráulico cuando se necesita parar al rotor en caso de sobrevelocidades o de mantenimiento.
- Generador.- Es el dispositivo conversor de energía mecánica en energía eléctrica. El generador eléctrico puede ser un generador síncrono, asíncrono o de imanes permanentes.

- **Torre.** - Estructura de tipo tubular o reticular construida generalmente de acero. Esta sostiene al aerogenerador y mantiene al rotor en un zona libre de turbulencias causadas por el terreno, árboles, construcciones, etc. Otra función de la torre es captar mayor cantidad de energía eólica, debido al incremento de la velocidad del viento con la altura.
- **Barquilla.** - Es la estructura en la que se encuentran montados los elementos del generador. Generalmente es una estructura metálica de acero.

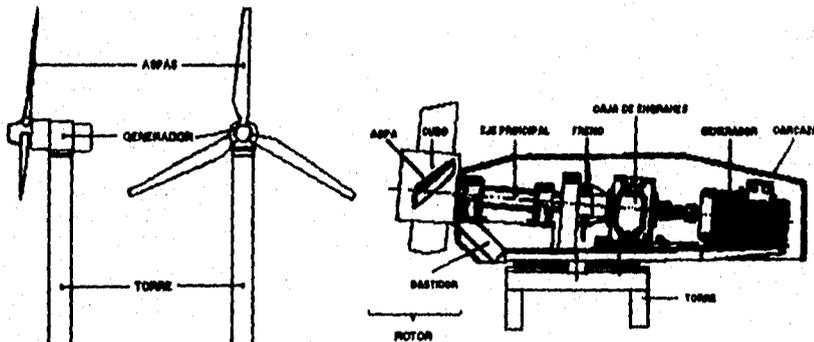


Figura 2.1. Esquema de un aerogenerador moderno.

### 2.1.1. Generador eléctrico

Los sistemas de "velocidad variable-frecuencia variable" son utilizados para cargar baterías, siendo frecuente en aerogeneradores de pequeña potencia ( $< 10\text{kW}$ ). (Olade, 1984)

En instalaciones pequeñas, los generadores eléctricos son dinamos tipo derivación (shunt) o alternadores multipolares. Estos últimos pueden suministrar corriente continua después de una etapa de rectificación. La producción de corriente continua permite su almacenamiento en un banco de baterías. El alternador con relación al

dínemo presenta le ventaja de proporcionar mayor rendimiento, además de suministrar energía eléctrica proporcional a la velocidad. (Meyer y Gerhard, 1988)

En grandes instalaciones se emplean generadores síncronos o asíncronos.

### 2.1.2. Dispositivos de regulación

Debido a las variaciones de velocidad del viento se emplean reguladores de velocidad. Estos dispositivos sirven también como limitadores de potencia y de los esfuerzos sobre las aspas en caso de vientos fuertes.

Otra finalidad de los dispositivos de regulación es la de mantener la velocidad de rotación del aerogenerador casi constante. La regulación puede llevarse a cabo variando el ángulo de incidencia del viento con respecto a las aspas o por abatimiento de la turbina eólica. (Garza, 1994)

Las aspas de paso variable permiten la adaptación del rotor a diferentes condiciones de viento así como el repliegue de éstas en caso de fuerte viento, en donde los esfuerzos que se ejercen sobre el rotor se reducen a valores mínimos. (Garza, 1994)

### 2.1.3. Dispositivos de orientación

Debido a que el viento varía constantemente en velocidad y también en dirección, los aerogeneradores se auxilian de dispositivos que los orienten con respecto a la dirección del viento.

Los dispositivos de orientación más empleados son:

- Aleta estabilizadora (cola).
- Eólica auxiliar (rotores laterales).
- Servomotores
- Dispositivos manuales.

#### 2.1.4. Rectificador de fase controlada

En las instalaciones donde los generadores eléctricos son alternadores, se necesita una etapa de rectificación para poder almacenar energía eléctrica en las baterías.

Dicha etapa puede consistir en un simple puente de diodos de onda completa o puede ser un rectificador de fase controlada.

El rectificador de fase controlada se emplea para optimizar el flujo de potencia de la turbina eólica al banco de baterías. [Nayar, 1993]

La función básica de un convertidor de fase controlada es convertir un voltaje alterno de amplitud y frecuencia variable, a un voltaje c.d. variable o constante. Los dispositivos utilizados para este tipo de convertidor son generalmente SCR's.

El valor promedio (RMS) del voltaje de salida es controlado por la variación del tiempo de conducción del SCR. El SCR es encendido por un pulso en la compuerta y es apagado por conmutación natural. [Dorf, 1993]

En la figura 2.2 a) se muestra un convertidor trifásico de onda completa controlado por 6 tiristores. Los tiristores  $T_1$ ,  $T_3$  y  $T_5$  son encendidos en el medio ciclo positivo de los voltajes de fase a los cuales se encuentran conectados; similarmente los tiristores  $T_2$ ,  $T_4$  y  $T_6$  son encendidos en el medio ciclo negativo de los voltajes de fase. El voltaje de salida, corriente de salida y las formas de corriente de entrada ideales se muestran en la figura 2.2 b).

El voltaje de salida está controlado por la variación del ángulo de disparo  $\alpha$ . El voltaje de salida promedio está dado por:

$$V_o = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \cos \alpha$$

Donde  $E_m$  es el valor pico del voltaje de fase. A un ángulo  $\alpha = 90^\circ$ , el voltaje de salida es cero. Para  $0 < \alpha < 90^\circ$ ,  $V_o$  es positivo y el flujo de potencia es del suministro de c.e. a la carga. Para  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ ,  $V_o$  es negativo y el convertidor opere en el modo de inversor. [Dorf, 1993]

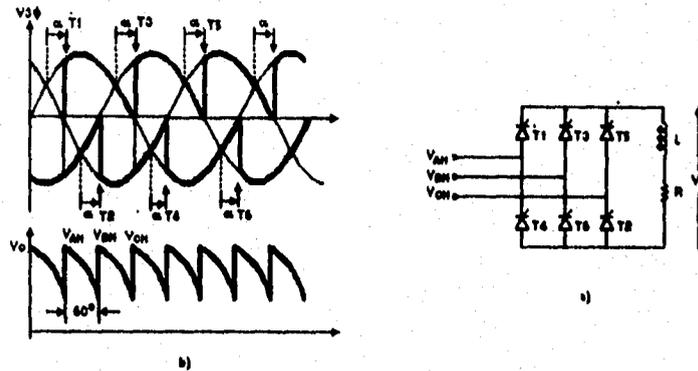


Figura 2.2. Rectificador de fase controlada.

### 2.1.5. Resistencias de descarga

El aerogenerador puede también tener un disipador el cual consta de un grupo de resistencias de descarga. Estas resistencias de descarga disipan la energía de tal manera que la turbina gire siempre a su carga óptima aunque el banco de baterías esté completamente cargado. Esto prevendrá el sobragiro de la turbina eólica. La carga a tensión constante se realiza controlando la potencia que llega al banco de baterías y usando las resistencias de descarga para disipar el exceso de potencia eléctrica proveniente de la turbina. (Nayar, 1993)

## 2.2. PRINCIPIO DE OPERACION

Debido al calentamiento de la superficie terrestre por la radiación solar, aunado al movimiento de rotación, existen en la atmósfera diferencias de presión que desplazan constantemente masas de aire. La corriente resultante constituye el viento, éste posee una gran cantidad de energía que es aprovechada para mover a una turbina eólica.

El generador eléctrico produce potencia cuando el rotor del aerogenerador alcanza la velocidad necesaria para iniciar su operación. La corriente alterna producida por un aerogenerador proviene del movimiento relativo de una bobina y un campo magnético, y la frecuencia de esta corriente depende de la velocidad de rotación de la turbina

eólica. Si la velocidad del viento aumenta la potencia eléctrica también aumenta. La potencia eléctrica de c.a. producida por el generador eléctrico es posteriormente rectificadora para obtener c.d. y de esta manera poder ser almacenada en un banco de baterías.

Existen mecanismos que varían el ángulo de las aspas, cuando surgen fuertes vientos, con ello se disminuye la velocidad de giro del rotor. Estos mecanismos son conocidos como frenos aerodinámicos. Los alerones son otro tipo de freno aerodinámico que se despliegan automáticamente de las aspas por acción centrífuga. En máquinas pequeñas se utilizan mecanismos de eje abatible donde el viento levanta y gira el rotor casi  $90^\circ$ .

Para proteger al aerogenerador de daños estructurales y eléctricos debidos a fuertes vientos, el generador eléctrico se saca de operación desconectándolo de la línea y deteniendo el rotor por completo mediante los frenos mecánicos. Esta desconexión y acción de frenado se realiza cuando el aerogenerador alcanza la "velocidad de salida de operación". También se harán paros de emergencia por sobrecalentamiento de los devanados del generador o vibraciones excesivas del rotor. (Garza, 1994)

Cuando se emplean generadores asíncronos en sistemas independientes, éstos necesitan potencia reactiva para la creación del campo magnético giratorio. Dicha potencia la obtienen de un banco de capacitores. La corriente de magnetización que necesita una máquina de inducción está en función del voltaje en sus terminales, por lo que los capacitores deben de suministrar dicha corriente de magnetización. Si por alguna causa el generador se desconecta de la línea y su rotor sigue girando por arriba de la velocidad síncrona, el campo magnético remanente del estator inducirá pequeñas fem's, que aplicadas a los capacitores generarán corrientes reactivas que reforzarán el campo magnético remanente, aumentando de nueva cuenta las fem's inducidas hasta alcanzar un estado estacionario, determinado por la saturación del circuito magnético y la característica lineal de los capacitores. Este fenómeno se conoce como autoexcitación que, sumado a la corriente de magnetización necesaria para excitar al generador, puede provocar daños en capacitores, gabinetes, conductores y devanados del generador, si no se toman medidas necesarias de protección.

## CAPITULO 3

# GENERACION DIESEL-ELECTRICA

### 3. GENERACION DIESEL-ELECTRICA

#### 3.1. DESCRIPCION DE UNA PLANTA ELECTROGENA

Una planta electrógena del tipo diesel-eléctrico consta de un motor diesel, acoplamiento, volante de inercia, y generador síncrono. El acumulador de energía cinética está constituido por el volante de inercia, cuya función es arrastrar al motor diesel. La energía proporcionada por el volante de inercia garantiza que la tensión y la frecuencia del generador permanezca dentro de las tolerancias exigidas hasta que el motor diesel asuma la carga. [Günter, 1989]

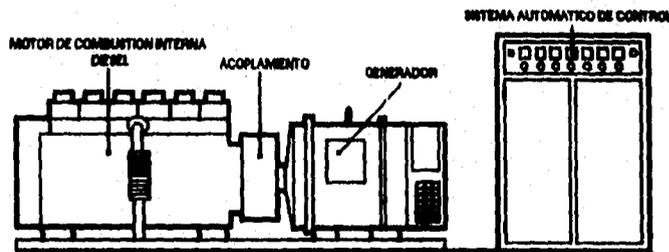


Figure 3.1. Configuración básica de un grupo electrógeno con sistema automático

La operación de plantas electrógenas abarca desde su empleo durante tiempos limitados, hasta la operación permanente. En nuestro caso la planta no tiene dependencia con la red pública sino que opera en forma aislada o en paralelo con otras fuentes generadoras de potencia eléctrica.

Las plantas diesel-eléctricas pueden ser fijas o móviles. Las móviles según su peso y tamaño, pueden ser portátiles, transportables o desplazables. De acuerdo con el tiempo de transferencia exigido en el sistema, se utilizan plantas normales, de disponibilidad rápida, y de disponibilidad inmediata (ver tabla 3.1).

## ABASTECIMIENTO AUXILIAR DE ENERGIA ELECTRICA

Transferencia de carga			
Sin tiempo especificado	Con tiempo especificado		
Grupos estándar	Grupos estándar	Grupos de disponibilidad rápida	Grupos de disponibilidad inmediata
		Interrupciones largas por ejemplo, 15s.	Interrupciones breves por ejemplo, 0.5s.
Con puesta en marcha manual	Con puesta en marcha automática		

Tabla 3.1 Empleo de grupos electrógenos para abastecimiento auxiliar de energía eléctrica.

Las plantas electrógenas se proporcionen a la tensión y frecuencia normalizadas. Las que cuentan con potencias mayores a 5 kVA se equipan con motores diesel, por operar éstos en forma económica. Las de menor tamaño disponen de motores a gasolina. [Günter, 1989]

Como potencia nominal se considere la potencia eléctrica aparente (kVA) disponible en las terminales del generador. Normalmente el factor de potencia es de 0.8 y la temperatura del medio es de 40°C. La potencia nominal del motor de combustión interna se indica en kW.

Debido a que las plantas electrógenas han de estar constantemente en disposición de prestar servicio, es necesario realizar con regularidad pruebas de funcionamiento para su control. Además, se deben establecer períodos regulares para mantenimiento del equipo.

### 3.1.1. Motor diesel

Las máquinas diesel son motores de combustión interna de encendido por compresión. Estos pueden ser de 2 ó 4 tiempos. La alimentación de combustible se realiza por inyección. Para potencias medias y pequeñas se utilizan motores diesel de 4 tiempos.

Las partes principales de una máquina diesel son (ver figura 3.2):

- a) El cilindro dentro del cual se desplace el pistón con movimiento rectilíneo alternativo. El conjunto de cilindros constituye el monoblock.
- b) La base que sostiene al monoblock.
- c) El cabezal que cierra la parte superior del cilindro.
- d) La cámara de combustión, que es el volumen comprendido entre el cabezal superior y el pistón.
- e) La válvula de aspiración y de descarga.
- f) El inyector.
- g) El árbol de levas o árbol motor.
- h) El árbol de distribución que controla las válvulas.

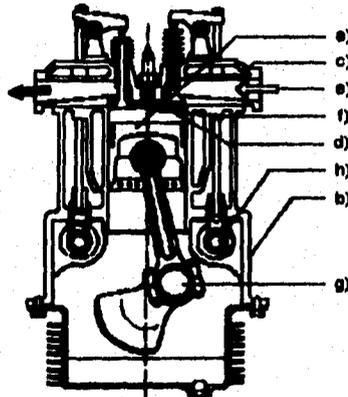


Figura 3.2. Partes de un motor de combustión interna diesel.

La refrigeración directa por aire se emplea en motores diesel con potencias de hasta 185 kW aproximadamente. Los motores refrigerados por agua están provistos de radiadores de panel con ventiladores o intercambiadores de calor. [Günter, 1989]

### 3.1.2. Generador

Los generadores síncronos o alternadores son máquinas transductoras que convierten la energía mecánica de un primotor, en este caso un motor diesel, en energía eléctrica

de voltaje y frecuencia específicos. El término síncrono se refiere a que la frecuencia eléctrica está relacionada o sincronizada con la con la velocidad de rotación de su eje.

El generador eléctrico que utilizan las plantas diesel-eléctricas generalmente es un alternador o generador síncrono sin escobillas. La excitatriz sin escobillas es un pequeño generador de c.a., con su circuito de campo montado en el estator y con la armadura montada sobre el eje del rotor. Por medio del control de la corriente de campo de la excitatriz (localizado en el estator), se consigue ajustar la corriente de campo del generador principal. (Chepman, 1988)

Para lograr que la excitación del generador sea independiente de cualquier fuente de energía exterior, se montan imanes permanentes en el eje del rotor. La finalidad de éstos es suministrar la energía de campo de la excitatriz, la cual alimenta al circuito de campo de la máquina principal.

### 3.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

#### 3.2.1 Motor diesel

El motor diesel realiza las siguientes etapas de funcionamiento (ver figura 3.3):

- a) *Admisión.*- En la admisión la válvula de aspiración permite la entrada al cilindro de aire puro a presión atmosférica.
- b) *Compresión.*- Cerrada la válvula instantáneamente, el pistón inicia la fase de compresión, alcanzando una temperatura de  $500^{\circ}\text{C}$  y una presión de aproximadamente  $40 \text{ kg/cm}^2$ .
- c) *Combustión y expansión.*- Por medio del inyector se introduce combustible finamente pulverizado para realizar la combustión a presión constante. Los gases completamente quemados se expanden obteniéndose un trabajo útil.
- d) *Escape.*- Por último, la presión desciende en forma instantánea hasta alcanzar el valor de la presión atmosférica cuando la válvula de descarga se abre permitiendo la expulsión de los gases de la combustión.

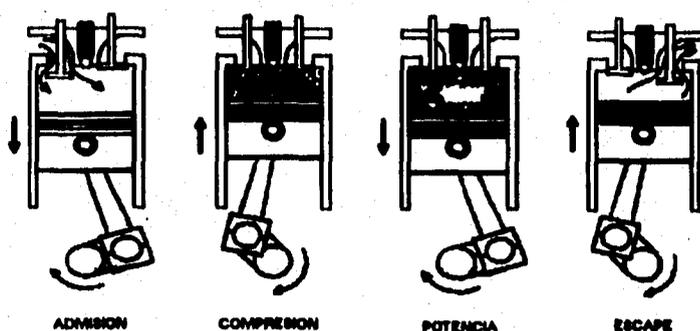


Figura 3.3. Motor diesel de cuatro tiempos.

Para el correcto funcionamiento del motor diesel es necesario un conjunto de mecanismos que tienen como función principal la apertura y cierre de las válvulas en el momento justo, permitiendo que se realice de mejor manera el ciclo real, acercándose tanto como sea posible al ciclo teórico. A este conjunto de mecanismos se denomina distribución.

Los motores diesel son capaces de trabajar con una sobrecarga del 10% durante una hora, cada 12 horas aproximadamente. Todos los motores de combustión interna presentan un grado de irregularidades que originan oscilaciones de tensión y frecuencia. La magnitud de tales oscilaciones depende de la carga conectada. [Günter, 1989]

### 3.2.2. Generador eléctrico

El rotor del generador síncrono consiste en un electroimán el cual es alimentado por una fuente de c.d. El campo magnético creado por los conductores del rotor (electroimán) es giratorio e induce en los devanados del estator un sistema trifásico de voltajes de c.a. tal como lo muestra la figura 3.4. [Chepman, 1988]

El voltaje interno generado depende de la velocidad de rotación del rotor y la magnitud del flujo de corriente de campo. El voltaje de fase de la máquina difiere del voltaje generado en terminales, debido a la impedancia síncrona.

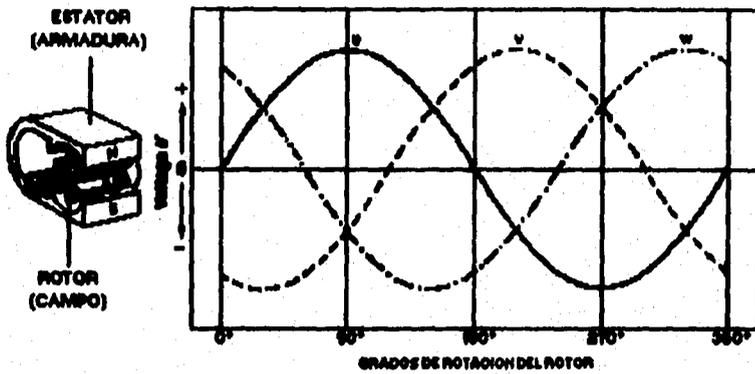


Figura 3.4. Principio de operación de un generador síncrono.

La capacidad del generador síncrono de producir energía eléctrica queda limitada principalmente por el calentamiento de sus embobinados y por la saturación de sus circuitos magnéticos. La vida útil del generador se reduce con el sobrecalentamiento de sus devanados. El calentamiento máximo permitido del devanado de armadura fija los kVA del generador; y el calentamiento máximo permisible del devanado de campo fija la máxima magnitud del voltaje inducido interno de la máquina. [Chapman, 1988]

## CAPITULO 4

# SISTEMA HIBRIDO

### 4. SISTEMA HIBRIDO

El esquema básico de un sistema híbrido EFD se muestra en la figura 4.1.

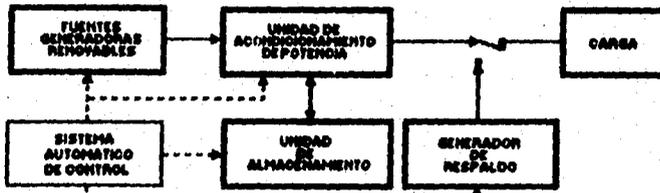


Figura 4.1. Esquema de un sistema híbrido EFD.

Un sistema híbrido EFD está constituido por una fuente del tipo fotovoltaica y otra eólica, respaldadas con una planta diesel-eléctrica; como elemento de apoyo cuenta con un sistema de control automático, una unidad de almacenamiento y una unidad acondicionadora de potencia eléctrica.

Todas estas componentes están descritas en los capítulos 1, 2, 3 y 6.

#### 4.1. UNIDAD DE ALMACENAMIENTO

La energía producida por el aerogenerador y el conjunto fotovoltaico es almacenada en una unidad diseñada para tal fin. La unidad de almacenamiento está constituida por un banco de baterías de plomo-ácido o níquel-cadmio.

##### 4.1.1. Batería

La batería es un dispositivo que almacena energía eléctrica por medio de relaciones electroquímicas (carga), teniendo la capacidad de realizar al proceso inverso

(descarga). Las capacidades de las baterías van desde 100 Ah hasta los 3,000 Ah. Las baterías deben cumplir con las especificaciones técnicas de las normas IEC 898-1, DIN 40734, 40736 y 40738.

Las baterías están constituidas por celdas conectadas en serie o paralelo para obtener la capacidad deseada de tensión y corriente. Cada celda está formada por los siguientes componentes básicos:

- **Electrodos.**- el electrodo negativo (ánodo) es principalmente de plomo (Pb) o níquel (Ni), dependiendo del tipo de acumulador. El electrodo positivo (cátodo) es, para las baterías de ácido, dióxido de plomo ( $PbO_2$ ) y para las alcalinas, de óxido de níquel (NiO).
- **Electrólito.**- el electrolito es una solución acuosa de un ácido, una base o sales. En el acumulador Pb-ácido, el electrolito se compone de una solución del 37% de ácido sulfúrico (densidad  $1.28 \text{ gr/cm}^3$ ), y en el acumulador níquel-cadmio, el electrolito es una solución de 25% de hidróxido potásico (densidad  $1.26 \text{ gr/cm}^3$ ).
- **Separadores.**- La función del separador es aislar las placas de diferente polaridad, evitando el cortocircuito en el interior de la celda. Algunos de los materiales utilizados para su fabricación son el poliéster y el polistilano.
- **Elemento.**- cada elemento se compone de dos conjuntos de placas de diferente polaridad, donde las placas positivas y negativas van alternándose y están aisladas por los separadores. Las placas de la misma polaridad se unen eléctricamente.

**Capacidad.**- La capacidad de una batería es la cantidad de electricidad entregada por la batería en la reacción electroquímica bajo condiciones específicas en amperes-hora (Ah).

El valor de la capacidad es el producto de la intensidad de corriente de descarga (amperes) por la duración de la descarga (horas). [Fullea, 1994]

**Potencia.**- La potencia de la batería es el producto de la tensión por la intensidad de la corriente de descarga.

$$P = IE$$

**Energía.**- La energía de una batería viene dada por el producto de la capacidad (Ah) por la tensión (V). La energía al igual que la capacidad dependen del régimen de descarga del sistema y se mide en watts-hora (Wh). (Fullea, 1994)

#### 4.1.2. Carga y descarga

En las baterías de plomo-ácido el material activo es el peróxido de plomo ( $PbO_2$ ), el plomo (Pb) y el electrolito de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). El ácido actúa como un conductor iónico para cargar y descargar la batería. El voltaje en circuito abierto es de 2V aproximadamente por celdas. Este aumenta durante la carga y disminuye durante la descarga. Cuando se descarga, el  $PbO_2$  y Pb reaccionan con el  $H_2SO_4$  para formar sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ), por tal razón, el electrolito pierde iones de sulfato ( $SO_4$ ) y la gravedad específica del electrolito baja. Durante la carga, los materiales activos  $PbO_2$  y Pb son reconstruidos del  $PbSO_4$ . (Fullea, 1994)

Las reacciones químicas relacionadas con la carga y descarga se presentan a continuación:



En las baterías de Níquel-Cadmio, las reacciones químicas de carga y descarga son:



La aceptación de carga depende de varios factores, tales como condiciones de carga, temperatura, estado de carga, vida del acumulador y contaminantes.

#### • Descarga

Uno de los principales problemas en sistemas híbridos es la estratificación del electrolito. Esta se produce cuando el acumulador se carga insuficientemente después

de ser descargado profundamente. El ácido generado por su mayor densidad queda en el fondo de la batería. La forma normal de evitar la estratificación es por el paso de una intensidad de corriente suficientemente elevada al final de la carga, de forma que los gases generados en los electrodos (oxígeno e hidrógeno) agiten el electrolito y produzcan su homogeneización. [Fullea, 1994]

La estratificación produce una degradación progresiva de las placas del acumulador. Existen sistemas para evitar este problema como son la recirculación del electrolito o el bombeo de aire.

Las descargas profundas pueden dañar severamente a las baterías. Cuando una batería se la somete a una descarga completa o profunda, no puede cargarse después debido principalmente a la corrosión del electrodo positivo y a la cristalización del material activo. [Fullea, 1994]

Los acumuladores que se encuentran en circuito abierto y los que están almacenados, presentan con el tiempo una pérdida de su capacidad. A este fenómeno se lo conoce como autodescarga.

#### ● Carga

Los métodos de carga más utilizados son:

- Carga a tensión constante (U). Es peligroso utilizar este sistema con un valor alto de tensión y sin control de temperatura. La batería puede explotar (ambalamiento).
- Carga a intensidad y tensión constante (IU).
- Carga a intensidad constante (Ia).
- Carga con tensión creciente (Wa).

Los métodos específicos de carga empleados en circunstancias especiales son:

- Carga de igualación.- Se realiza en baterías con gran número de elementos y que por su uso presentan diferentes tensiones entre los mismos.

- **Carga de flotación y carga de compensación.**- Este tipo de carga tiene la finalidad de compensar las pérdidas producidas por autodescarga. La carga de flotación se realiza a tensión constante, mientras que la carga de compensación se realiza a intensidad constante.

La corriente de carga que no se emplea para transformar los materiales activos se conoce como sobrecarga. Las sobrecargas producen efectos negativos en el acumulador como son:

- Corrosión de los electrodos.
- Generación de gases.
- Embalamiento.

#### 4.1.3. Factores que influyen en las baterías

Los factores que influyen en la capacidad de las baterías son:

- **Duración de la descarga.**- La intensidad de corriente de descarga influye en la capacidad de la batería, en el sentido de que cuanto mayor sea la intensidad, menor es el valor de la capacidad.
- **Temperatura.**- La temperatura del electrolito también influye en la capacidad, cuanto más alta es la temperatura, mayor es la capacidad.
- **Tensión final de corte.**- La tensión de corte es la tensión que indica la finalización de la descarga para que la capacidad obtenida de la batería sea útil.

Con los ciclos de carga y descarga se produce una disminución progresiva de la capacidad de la batería. Los factores que influyen en la vida del banco de baterías debido a los ciclos de carga-descarga son:

- **Profundidad de descarga.**- es el porcentaje de la capacidad del acumulador que se descarga en cada ciclo. Las acumuladoras de níquel-cadmio son superiores a las de plomo-ácido con respecto a este punto.

- *Régimen de descarga*.- Cuanto mayor sea el régimen de carga y el porcentaje de sobrecarga menor será la vida de las baterías.
- *Temperature*.- las altas temperaturas producen problemas en el acumulador debido principalmente a la mayor corrosión de los electrodos.

#### 4.1.4. Tipo de baterías

En instalaciones fijas se utilizan baterías de plomo-ácido o de níquel-cadmio.

La densidad del electrolito permite conocer el estado de carga en las baterías de Pb-ácido. Sin embargo, en las baterías de Ni-Cd esto no pueda ser posible. [Fullea, 1994]

La elevación de la tensión se utiliza como señal para determinar el final de la carga en sistemas de intensidad constante. En los sistemas de tensión constante, la carga completa se detecta por una fuerte disminución de la corriente que admite la batería.

Las ventajas que presenta el acumulador NiCd con respecto a las de Pb-ácido, son:

- Larga vida.
- Puede almacenarse en bajo estado de carga sin problemas.
- Buen comportamiento a bajas temperaturas.

Sin embargo, el mayor inconveniente, además de la toxicidad del cadmio, es el elevado costo.

Rango de temperaturas	Tipo de batería
Temperaturas bajas (-40°C a +10°C)	Baterías Ni-Cd
Temperaturas normales (-10°C a +20°C)	Baterías Pb-ácido
Temperaturas altas (+20°C a +55°C)	Baterías Pb-ácido

La decisión de emplear una batería de Pb-ácido o de Ni-Cd depende, en general, de la temperatura del lugar de montaje. En México es raro encontrar zonas con temperaturas menores a  $-10^{\circ}\text{C}$ , por lo que usualmente se utilizan baterías de plomo-ácido.

Características	Pb-ácido	Ni-Cd
Tensión nominal	2.00V	1.20V
Tensión de igualación	2.65V	1.75V
Tensión de flotación	2.23V	1.40V
Corriente de flotación	25mA/100Ah	50mA/100Ah
Factor de carga	1.20	1.40
Temperatura de operación	$-10^{\circ}\text{C}$ a $55^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$ a $45^{\circ}\text{C}$

#### 4.2. UNIDAD ACONDICIONADORA DE POTENCIA

La unidad acondicionadora de potencia está constituida por los siguientes dispositivos:

- Inversor.
- Controlador de carga.

##### 4.2.1. INVERSOR

###### Descripción del inversor

Los inversores son convertidores de c.d. a c.a. Estos dispositivos para sistemas independientes funcionan con tensiones de 12, 24, 48 ó 120 Vcc de entrada y con salida de 120 ó 240 Vca a 60 Hz. [Sandia, 1990]

Los inversores se clasifican de acuerdo a la forma de onda que producen. Las formas de onda más comunes son:

- **Onda cuadrada.**- estos inversores producen una salida de c.a. con poco control de tensión, capacidad limitada de protección contra sobretensiones transitorias y una gran distorsión armónica. Son los menos costosos, siendo adecuados solo para pequeñas cargas como calentadores con resistencia eléctrica y lámparas incandescentes.
- **Onda senoidal modificada.**- estos equipos pueden soportar mayores perturbaciones transitorias; la salida tiene menos distorsión armónica. Son apropiados para alimentar equipos electrónicos y motoras, sin embargo, su rendimiento con cargas inductivas es menos eficiente que el de onda senoidal, debido a que la energía de las armónicas se disipa en los bobinados.
- **Onda senoidal.**- producen un forma de onda de c.a. comparable a la de una red de distribución convencional. Dichos inversores pueden alimentar cualquier tipo de carga eléctrica dentro de su capacidad nominal.

La tensión de entrada del inversor es determinada por la potencia total requerida para alimentar las cargas: a mayor carga demandada, mayor deberá ser la tensión de entrada del inversor.

Para altas potencias generalmente los inversores están constituidos por tiristores SCR del tipo GTO, los cuales deben de actuar como interruptores; además deben de contar con un circuito externo de conmutación forzada para apagarlos. Este tipo de bloqueo forzado proporciona una tensión de salida independiente de la carga conectada. [Dorf, 1993]

Para potencias medias de hasta 750 A y 600 V, se emplean transistores tipo IGBT. Mientras que para bajo voltaje y baja potencia son preferidos los MOS FET's.

Si el inversor se alimenta a partir de una batería, se puede regular la tensión del mismo mediante un controlador de carga, un trocador (chopper) o incluso por medio de un regulador serie, si la potencia manejada es pequeña. Un inversor puede tener un flujo de potencia activo en cualquier dirección, por lo que puede comportarse como un convertidor de c.a. a c.d. para la carga de baterías. [Gualde y Martínez, 1979]

**OPERACION**

Los métodos que se utilizan para obtener una onda de c.a. son:

- Método de onda cuadrada.
- Modulación por ancho de pulso (PWM).

En ambos métodos la frecuencia de salida es controlada por el inversor.

**● Método de onda cuadrada**

En modo de onda cuadrada la frecuencia del sistema es controlada dentro del inversor; los dispositivos utilizados se emplean para conmutar la salida entre el más y el menos de la fuente de c.d.

El voltaje de salida tiene un gran número de armónicas. Se pueden utilizar filtros de 2° y 3° orden para eliminar tales armónicas, pero es costoso y existe una gran dependencia de la carga conectada debido a las grandes variaciones de tensión que éste presenta. Por tal razón se necesita proveer un inversor con forma de onda exenta de armónicas de bajo orden.

En algunas aplicaciones una salida de onda cuadrada puede ser aceptable. Sin embargo, en varias aplicaciones, es deseable una forma de onda de voltaje senoidal con limitada distorsión armónica. Un límite típico en especificaciones de equipo es de 5% de armónicas relativos a la magnitud de la frecuencia fundamental. Para reducir el gran número de armónicas presentes en la salida se emplea la neutralización armónica. [Fink, 1989]

*Neutralización armónica.* - En este método se utilizan "N" dispositivos de conmutación en la salida de c.d. Cada dispositivo conduce por  $180^\circ$  y cada señal de salida está defasada  $180^\circ/N$  grado eléctricos. En general, para una salida de c.a., cada onda cuadrada contribuye a la salida de cada fase por medio de su adición fasorial, como se ve en la figura 4.2. La amplitud del voltaje de salida está controlada por la variación del voltaje de entrada, por tal motivo los inversores tipo onda cuadrada no son

recomendables si la fuente de c.d. es un batería, debido a descarga gradual. El voltaje de salida también depende del ángulo de disparo de los tiristores.

En lugar de una onda cuadrada se obtiene una onda senoidal en la cual la mayoría de armónicas han sido neutralizadas. Las armónicas restantes se encuentran en pares y tienen frecuencias de  $2kN \pm 1$ , donde  $k = 1, 2, 3, \dots, n$ . Las amplitudes de las armónicas restantes, con respecto a la fundamental, son inversamente proporcional a sus frecuencias. [Fink, 1989]

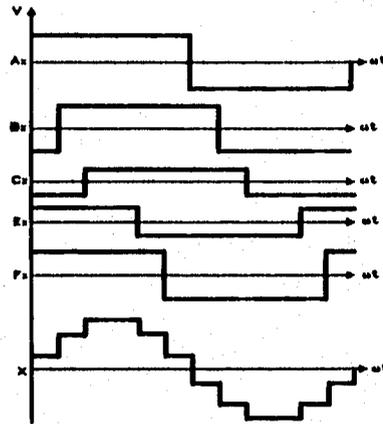


Figura 4.2. Método de onda cuadrada, con neutralización armónica.

#### ● Modulación por ancho de pulso (PWM)

En los inversores PWM, el voltaje y la frecuencia están controlados dentro del inversor variando el ancho de los pulsos de salida. En este método, una onda portadora triangular de alta frecuencia es comparada con una forma de onda senoidal trifásica, como se muestra en la figura 4.3. El interruptor de potencia de cada fase es conmutado en la intersección de la onda senoidal y la onda triangular. La amplitud y la frecuencia del voltaje de salida son variados, respectivamente, por la variación de la amplitud y la frecuencia de las ondas senoidales de referencia. La relación entre la amplitud de la onda senoidal y la amplitud de la onda portadora es denominado índice de modulación. [Dorf, 1993]



con el nivel de tensión. El controlador debe de controlar la máxima corriente producida por el conjunto fotovoltaico. Otras funciones de estos dispositivos son:

- Desconexión en caso de sobretensión y subtensión.
- Alarma de subtensión.
- Compensación de temperatura.
- Protección contra flujo inverso de corriente.
- Funcionamiento en el punto de máxima potencia.
- Medición de la tensión del sistema.

Si la corriente total del sistema excede la capacidad de corriente del controlador, se puedan usar varios controladores de carga en paralelo. El conjunto fotovoltaico puede estar conectado a un controlador de carga y el aerogenerador a otro. La salida del controlador puede estar conectada en paralelo con la entrada del banco de baterías. Sin embargo, no se recomienda conectar la entrada de los controladores provenientes del conjunto fotovoltaico y el aerogenerador en paralelo, ya que cuando se desconecte uno de los CC se puede producir una falla en el otro por sobrecarga. (Sandia, 1990)

#### ● Principio de funcionamiento

La parte más importante de un controlador de carga es el regulador de voltaje. El regulador de voltaje tiene la función de controlar la corriente proveniente tanto del módulo fotovoltaico como del aerogenerador al banco de baterías, para proporcionar un control óptimo de la corriente de recarga. Los reguladores de voltaje pueden ser desde simples resistencias hasta complejos circuitos electrónicos. Este dispositivo proporciona las condiciones apropiadas para la carga de baterías. Sin éste se tendrían severas sobrecargas o descargas que reducirían la vida de las baterías e incrementarían el costo del sistema debido a su constante reemplazo. (Sandia, 1979)

Un regulador de voltaje consiste básicamente de cuatro elementos (ver figura 4.4):

- Un voltaje de referencia,
- un elemento muestreador de voltaje,
- un comparador de voltaje y
- un dispositivo de control disipador de potencia.

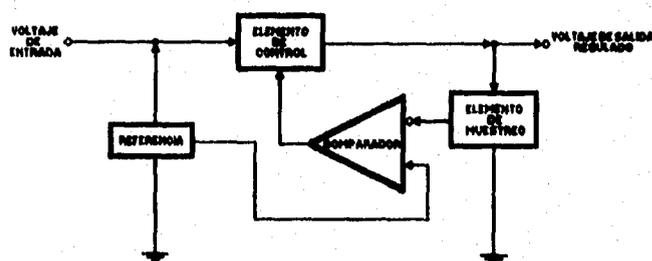


Figura 4.4. Diagrama a bloques de un regulador de voltaje.

El elemento muestreador de voltaje traslada el voltaje de salida a un nivel que sea igual al del voltaje de referencia. Entonces, cuando la salida de voltaje varía, el voltaje muestreado cambia su valor a un nivel mayor o menor que el voltaje de referencia. La diferencia de voltaje es registrada por un comparador al cual genera una señal de error. Dicha señal es amplificada y dirigida al elemento de control para realizar la función de regulación deseada. [Sandia, 1979]

El controlador de carga tienen uno de los siguientes cuatro circuitos reguladores, de donde también se deriva el nombre del mismo:

- Regulador peso serie.
- Regulador derivación.
- Regulador de conmutación serie.
- Regulador de conmutación derivación.

En el sistema híbrido el regulador actúa similarmente a una fuente de corriente constante, limitada por la corriente de corto circuito del arreglo fotovoltaico y la corriente máxima del aerogenerador cuando la capacidad de la batería se baja. Cuando la batería se aproxima a su carga completa, el regulador se comporta como una fuente de voltaje constante. El regulador puede ser diseñado para apagarse automáticamente cuando la carga se ha completado. Con un circuito apropiado de control, cualquier curva de recarga para el banco de baterías puede ser empleada.

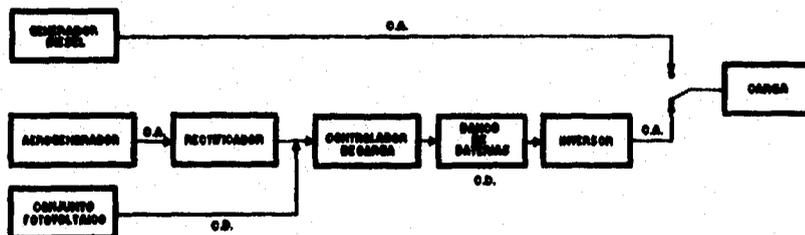
Los controladores tipo serie de etapa sencilla, desconectan al conjunto o al aerogenerador cuando la tensión de la batería alcanza un nivel predeterminado. Este controlador

elimina el uso de dispositivos para absorber el calor. Los CC en derivación eviten las sobrecargas al desviar la corriente del conjunto fotovoltaico hacia un dispositivo disipador de potencia, cuando la tensión de la batería excede el límite predeterminado. El calor generado por el disipador de potencia constituye una desventaja. El uso de ambos tipos se limita a sistemas pequeños, pero se han usado para controlar sistemas de mayor capacidad por medio de unidades conectadas en paralelo. [Sandia, 1979] Los controladores de etapas múltiples permiten usar diferentes corrientes de recarga, dependiendo del estado de la batería. Esto aumenta el rendimiento del proceso de carga y prolonga la vida útil de la batería. Se pueden usar varios controladores de etapa sencilla para obtener el mismo tipo de control. [Sandia, 1990]

### 4.3. ARQUITECTURA

A continuación se presentan algunas configuraciones del sistema híbrido EFD.

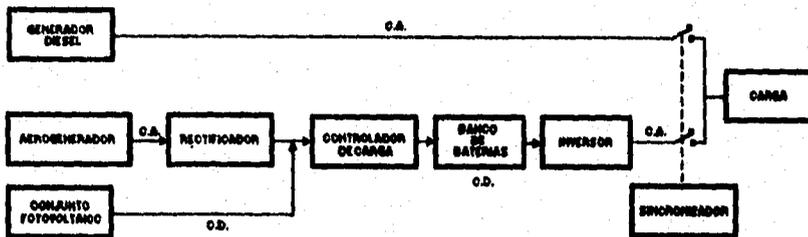
#### • Operación con planta eléctrica de respaldo



Generalmente este tipo de esquema es utilizado cuando los recursos energéticos son bastante altos. Se puede observar que la producción de energía eléctrica recae únicamente en el grupo aerogenerador-conjunto fotovoltaico, por lo que la planta diesel-eléctrica se utiliza sólo en caso de alguna falla en las fuentes renovables.

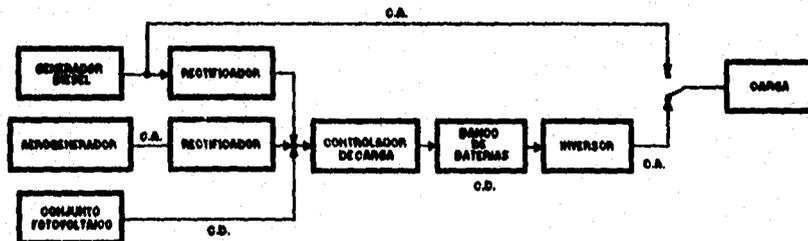
Una selección inadecuada de los sistemas renovables de energía provocará serios problemas, tales como avería a corto plazo del banco de baterías, uso frecuente del generador de respaldo, baja eficiencia del sistema general, etc.. Una de sus principales desventajas consiste en no poder utilizar la planta diesel-eléctrica para recargar las baterías en caso de no haber energía eólica o solar.

• Operación con inversor y planta electrógena en paralelo



Este arreglo se emplea usualmente cuando los recursos naturales no son suficientes. El inversor y la planta diésel-eléctrica comparten la potencia demandada por la carga, suministrando esta última la energía eléctrica en horas pico; también puede recargar el banco de baterías si se emplea un inversor reversible. Una de las principales desventajas que presenta es el incremento de costos de instalación y operación debido al tipo de instrumentos de sincronización y control.

• Operación con planta electrógena integrada



Un sistema de este tipo es utilizado en lugares donde los recursos energéticos son bajos. La planta diésel-eléctrica se emplea como respaldo en caso de falla de algún equipo, o como principal suministrador de potencia en caso de que los recursos naturales no sean óptimos. No se necesita de sincronización. Los arranques del motor diésel son más frecuentes, incrementando el consumo de combustible y su desgaste.

## **CAPITULO 5**

# **INSTALACION**

---

### **5. INSTALACION**

Todas las fuentes y el equipo electrónico de potencia deben tener una caja de empalmes o conexiones. La caja debe ser de cierre hermético y resistente a la intemperie para proteger tales conexiones. [Secofi, 1990]

#### **5.1. CONJUNTO FOTOVOLTAICO**

El conjunto fotovoltaico se puede instalar a un ángulo fijo desde el plano horizontal o se puede montar sobre un mecanismo seguidor del sol. El acimut preferible para la instalación del conjunto en el hemisferio norte es el sur verdadero. La disminución de energía no es importante si el acimut del conjunto se mantiene a  $\pm 20$  grados del sur verdadero. [Sandia, 1990]

En algunas ocasiones se sitúan al oeste del sur con el fin de orientar la producción hacia un máximo después del medio día.

En la mayoría de las aplicaciones fotovoltaicas, el máximo de energía anual se obtiene con un ángulo de inclinación próximo al de latitud. Los ángulos de inclinación de  $\pm 15$  grados orientan la producción de energía hacia el invierno o el verano, respectivamente. [Sandia, 1990]

Los módulos fotovoltaicos generalmente se instalan en el terreno o se montan en el techo de una construcción. Un conjunto en el suelo puede ser del tipo de inclinación fija o de seguimiento.

Debido a que la tensión varía inversamente proporcional a la temperatura de los módulos, éstos no deben instalarse al ras del suelo o el techo para obtener un colchón

refrigerante; por otro lado, deben estar libres de sombras de arbustos, ramas de árboles o de objetos.

Para el tamaño de cada módulo debe tomarse en cuenta la facilidad de manejo, así como los esfuerzos mecánicos ejercidos por el viento y el montaje.

El cimiento de la estructura soporte debe ser diseñado para resistir la fuerza del viento en la región de instalación.

### 5.2. AEROGENERADOR

Se recomienda tener un registro anemométrico de los últimos 5 años del sitio donde se instalará el aerogenerador. (Garza, 1994)

Para la instalación del generador eólico deben tomarse en cuenta las características del terreno, tipo de vegetación y condiciones ambientales tales como niveles caráunicos, ciclones, huracanes, nevadas, etc.

### 5.3. PLANTA ELECTROGENA

Se debe establecer un local adecuado para la planta diesel-eléctrica. En la siguiente tabla se indican algunos valores para dicho lugar de acuerdo a su potencia.

Potencia del grupo (kVA)	Largo (m)	base (m)	altura (m)
20 a 60	5.0	4.0	3.0
100 a 200	6.0	4.5	3.5
250 a 550	7.0	5.0	4.0
650 a 1500	10.0	5.0	4.0

El local debe estar configurado de tal forma que el ruido producido por el motor diesel no sea excesivo. Si es necesario, se preverá un aislamiento acústico.

La cimentación del grupo no debe estar unida a los muros del edificio para evitar transmisión de vibraciones. La instalación de amortiguadores reduce la transmisión de ruido y vibraciones.

Debido al calor producido por el grupo electrógeno se debe proveer una ventilación adecuada.

Para el escape de gases se utilizan generalmente tubos de acero. Los gases de escape se descargan al exterior a través de silenciadores.

#### **5.4. BANCO DE BATERIAS**

Para sitios húmedos se deben satisfacer las condiciones impuestas por normas, por ejemplo la norma VDE 0100. Las puertas de los recintos que contengan a las baterías se han de abrir hacia fuera.

Los aparatos que generen chispas deben guardar una distancia mínima de un metro de la batería. (Secofi, 1990)

Las baterías no deben colocarse directamente en el concreto, ya que podrían descargarse si la superficie se humedece demasiado. Según su tamaño, las baterías pueden ser montadas en armarios, bastidores o individualmente sobre aisladores. Estos pueden ser de madera tratada o metal tratado. El piso del local donde es probable que el ácido se desparrame o acumule, debe ser de material resistente al ácido, o estar protegido del mismo.

Se debe proveer una buena ventilación que garantice la pérdida de capacidad explosiva de los gases de hidrógeno y oxígeno, producidos por los ciclos de carga-descarga del banco de baterías de electrólito.

La entrada de aire debe estar cerca del suelo mientras que la salida será en el lado opuesto y cerca del techo, para obtener una óptima convección natural.

En caso de emplearse ventiladores, deben utilizarse del tipo aspiración, para que el aire que contiene ácido no pueda pasar a recintos adyacentes por sobrepresión.

## 5.5. EQUIPO ELECTRONICO

El sistema automático de control, los controladores de carga, rectificadores e inversores deben estar protegidos contra la intemperie. Los interruptores, fusibles y puntos de conexión se deben colocar en cajas herméticas del tipo recomendado por las asociaciones nacionales e internacionales de normatividad (por ejemplo las asociaciones NEMA, ANSI, IEEE, etc.).

Debido a que las altas temperaturas acortan la vida útil de los equipos electrónicos, se debe proveer la circulación de aire principalmente para los inversores, controladores de carga y el sistema automático de control.

### 5.5.1. Controlador de carga

El controlador de carga se instalará en un área con sombra y con una ventilación adecuada. Los controladores de tipo conmutación no deben ser instalados en la cercanía de las baterías que producen gases.

### 5.5.2. Inversor

El inversor no debe ser instalado en el mismo compartimento de las baterías porque los gases que se desprenden de las baterías son corrosivos y pueden dañar los circuitos electrónicos. Además el inversor puede producir chispas que podrían causar una explosión. Sin embargo, el inversor se debe instalar cerca de las baterías para evitar caídas de tensión debidas a pérdidas resistivas ocasionadas por corrientes elevadas debido a bajos voltajes. [Sandia, 1990]

## CAPITULO 6

# CONTROL

---

### 6. CONTROL

#### 6.1. DESCRIPCION

Es un sistema de control electromecánico operado por un microprocesador. Dicho sistema se compone de un adquisidor de datos, una unidad lógica de control (microprocesador), un grupo de sensores de variables físicas y un grupo de relés de control electromecánicos o de estado sólido.

##### 6.1.1. Microprocesador

La unidad central de proceso (CPU) es el sistema principal de un microprocesador. La CPU está constituida por tres subsistemas funcionales:

- *La unidad de control (UC).*- es el elemento controlador del flujo de información (instrucciones y datos) en el sistema de control. Las funciones de la unidad de control son: a) búsqueda de instrucciones en memoria; b) decodificación, interpretación y ejecución de las instrucciones; c) control de la secuencia de ejecución; d) reconocimiento de acciones externas de control: interrupciones, órdenes de paro, espera, inicialización, etc.
- *La unidad de cálculo (ALU, Arithmetic Logic Unit, unidad aritmética lógica).*- es el elemento calculador del sistema, capaz de realizar operaciones lógicas y aritméticas.
- *Generador de reloj.*

Estos tres subsistemas están total o parcialmente integrados en un único circuito LSI (alta escala de integración), al que se denomina microprocesador.

La unidad de control es la responsable del control de todo el sistema. Dicha función está apoyada por un generador de pulsos de reloj. Con él se sincronizan las señales de control dentro y fuera del microprocesador.

### 6.1.2. Memoria

El programa de control para el microprocesador está contenido en una memoria fija (no volátil), la cual se puede utilizar únicamente para leer información almacenada en ésta.

Otra propiedad importante de la ROM (Read Only Memory, memoria de sólo lectura) es que la información que contiene no se pierda cuando se interrumpe la tensión de alimentación.

Se utilizan las memorias del tipo EEPROM (Electrical Erasable ROM) o EAPROM (Electrical Alterable ROM), para grabar el programa de control del sistema EFD. Con este tipo de memorias se tiene la facilidad de modificar el programa de control en cualquier instante sin retirar el circuito integrado.

### 6.1.3. Unidad de entrada/salida

La unidad de entrada/salida se compone de circuitos integrados. Estos módulos forman la interfase entre el microprocesador y el sistema EFD (periférico).

Se denomina interfase al sistema hardware-software que permita la comunicación con un periférico determinado, es decir, el conjunto de circuitos (hardware) y programas (software) que se utilizan para establecer la comunicación.

Algunos de los periféricos utilizados en sistemas basados en microprocesadores son:

- *Interruptores, pulsadores y conmutadores:* Permiten entrar datos al sistema de control, seleccionar diversas opciones o modos de funcionamiento, dar órdenes de actuación, de forma manual. La forma de establecer la comunicación pueda

ser por medio de contactos metálicos, acoplamiento óptico, efecto capacitivo, magnéticos, etc.

- **Visualizadores.**- Den al operador un forma visible de la información, pudiéndose realizar por diversos métodos ópticos (diodos emisores de luz, cristal líquido, incandescencia, fluorescencia) y electromecánicos. La información puede ser de tres tipos, de acuerdo al visualizador:
  - **Binarios:** indicadores individuales.
  - **Númericos:** permiten visualizar los dígitos del 0 al 9 y algunas letras.
  - **Alfanuméricos:** permiten visualizar todo el alfabeto y caracteres especiales.
  
- **Convertidores A/D y D/A:** Muchas de las variables precisas en un sistema de control (temperatura, velocidad, vibración, inyección, etc) son captadas por transductores que trasladan la magnitud física considerada en variables eléctricas continuas (tensión, corriente), por lo que es necesario un convertidor analógico-digital (A/D) de la información de forma que pueda ser procesada por el microprocesador. Similarmente, la información de salida puede ser necesaria en forma analógica, siendo necesario en este caso un convertidor digital/analógico (D/A).

#### 6.1.4. Bus

El microprocesador, la memoria y la unidad de entrada/salida se encuentran interconectados eléctricamente, por lo que la información que llega a los diferentes módulos se realiza por un grupo de conductores a los cuales se denomina bus.

En el sistema se reconocen tres buses:

- **Bus de direcciones.**- está formado por conductores paralelos y tienen la finalidad de informar qué módulo de control o equipo del sistema EFD debe operar; este bus tiene la característica de ser unidireccional.

- **Bus de datos.**- es el portador de los datos. Por él fluye la información a procesar por el microprocesador, así como la información proveniente de la memoria o la unidad de entrada/salida. Como se puede observar, dicho bus es bidireccional.
- **Bus de control.**- indica las acciones a realizar por los diferentes módulos de control o elementos del sistema EFD.

Estos buses no deben confundirse con el bus de la instalación eléctrica del sistema EFD, relacionado con la integración de las fuentes de potencia o con la distribución de carga.

## **6.2. FUNCIONES DEL SISTEMA DE CONTROL**

En general, el sistema de control tiene dos funciones principales: la regulación y la coordinación del sistema.

Las funciones básicas del sistema de control son:

- Desconectar el inversor en caso de una falla en el sistema.
- Paro y arranque del motor diesel.
- Llevar a cabo los procesos de conmutación y sincronización entre el inversor y el generador síncrono del motor diesel.
- Supervisión del estado de carga de la batería por medio del monitoreo del controlador de carga.
- Activar alarmas en caso de falla.
- Medición de parámetros eléctricos, tales como voltaje y frecuencia.
- Supervisión de condiciones ambientales, por ejemplo, velocidad del viento, temperatura e insolación.
- Arranque y paro del aerogenerador.
- Orientación del rotor eólico.
- Orientación del conjunto fotovoltaico.
- Conexión y Desconexión de las fuentes generadoras.
- Detección de vibración excesivas de la turbina eólica.

## **CAPITULO 7**

# **PROTECCION**

---

### **7. PROTECCION**

#### **7.1. PROTECCION CONTRA SOBRECORRIENTES**

Las protecciones contra sobrecorriente deben funcionar adecuadamente en caso de falla si se requiere un nivel de confiabilidad aceptable.

La función de los dispositivos de protección contra sobrecorriente son:

- Aislar las fallas permanentes que se produzcan en el sistema EFD, además de desenergizar fallas transitorias antes de que se presente algún daño serio.
- Protección al equipo contra daño o destrucción bajo condiciones de altas corrientes de falla.
- Reducir el número y duración de interrupciones del servicio a los usuarios, originados por fallas.

Para la protección contra sobrecorriente deben considerarse las corrientes de falla, determinando los valores nominales requeridos en los equipos y su coordinación.

Los dispositivos empleados para la protección de equipos usualmente son:

- Interruptores.
- Fusibles.
- Seccionalizadores.

### 7.1.1. Interruptores

Un interruptor es un dispositivo de apertura o cierre mecánico capaz de soportar tanto corriente de operación normal como altas corrientes durante un tiempo específico, debidas a fallas en el sistema EFD.

*Interruptor termomagnético.*- Los interruptores termomagnéticos son capaces de interrumpir corrientes de sobrecarga y corrientes de cortocircuito. Están compuestos por un elemento térmico (protección contra sobrecarga), el cual acciona un contacto al incrementarse su temperatura debido al flujo de una corriente determinada en un tiempo específico. Dentro del interruptor también se encuentra un elemento magnético (protección contra cortocircuito) que acciona un contacto al circular una corriente de falla a través de éste.

### 7.1.2. Fusibles

El fusible es un elemento de aleación metálica que opera térmicamente cuando una sobrecorriente pasa a través de él, fundiéndose uno o varios filamentos para interrumpir la corriente excesiva. Su capacidad nominal es la corriente que puede soportar continuamente sin sufrir un calentamiento capaz de modificar sus características de diseño. Sus funciones principales son aislar la porción del circuito dañado del resto del sistema e impedir el daño de los equipos del mismo.

Con respecto al voltaje, éstos deben ser seleccionados de acuerdo a la máxima tensión entre fases que se puede presentar en el sistema.

Existen tres tipos de curvas de tiempo-corriente que definen a los fusibles: Las curvas características de fusión tiempo-corriente, las curvas instantáneas de corriente pico y las curvas  $I^2t$ . El primer tipo se aplica a toda clase de fusibles y las dos últimas para fusibles limitadores de corriente.

Un fusible está diseñado para fundirse en un tiempo especificado para una determinada magnitud de corriente. La corriente de fusión no debe variar  $\pm 10\%$  para un tiempo dado. (Espinoza y Lara, 1990)

Existen tres tiempos característicos de operación para la interrupción de un circuito:

1. *Tiempo mínimo de fusión (MMT)*.- Es el intervalo de tiempo que existe entre la aparición de la falla y el momento en que el elemento fusible se rompe por fusión y se establece el arco eléctrico.
2. *Tiempo de arqueo*.- Es el intervalo durante el cual persiste el arco eléctrico. El tiempo del arco se mide en ciclos y varía de 0.5 a 2 ciclos.
3. *Tiempo máximo de limpieza (MCT)*.- Es el intervalo de tiempo entre la aparición de la falla y la apertura total del elemento fusible, y es la suma de los dos tiempos anteriores.

Generalmente el fabricante proporciona dos juegos de curvas características tiempo-corriente para cada clase de fusibles: una es la familia de curvas de tiempo mínimo de fusión y la otra, la familia de curvas de tiempo total de interrupción.

### 7.1.3. Seccionizadores

Los seccionizadores abren sus contactos cuando la línea esté desenergizada, no cuentan con capacidad interruptiva para la corriente de falla ni, por lo tanto, de curvas características de operación tiempo-corriente, aunque sí tienen capacidad interruptiva suficiente para la corriente nominal de carga.

Los seccionizadores deben estar instalados en cajas apropiadas y deben ser accesibles y fáciles de operar. Los seccionizadores se diseñan tanto para c.a. como para c.c.

Los seccionizadores de c.c. son diseñados para ciertos niveles de corriente y tensión. Dos niveles de tensión comunes son: 250V y 800V. Los niveles de corriente de uso común son: 15, 30, 60, 100 y 200 A. El seccionizador debe de tener suficiente capacidad para soportar la corriente del fusible. Se recomienda especificar primero los fusibles y después seleccionar el interruptor. [Sandie, 1990]

#### 7.1.4. Coordinación

El propósito de la coordinación de los dispositivos de protección es proveer confiabilidad al sistema; sus funciones son aislar solamente la línea o equipo fallado del sistema con la mayor rapidez posible y minimizar la magnitud del disturbio. La coordinación de los dispositivos debe hacerse en serie o "cascada".

Cuando dos o más dispositivos de protección son utilizados en el sistema, el dispositivo más cercano a la falla del lado de alimentación es el dispositivo protector y al siguiente más cercano del lado de alimentación es el respaldo.

Es indispensable para una buena coordinación que el dispositivo protector debe operar y dejar la corriente de falla antes que el dispositivo de respaldo opere.

El sistema está protegido por interruptores, fusibles y seccionadores. Las características de operación de cada dispositivo se relacionan de tal forma que sean susceptibles de coordinarse con otros dispositivos de protección, para obtener la secuencia de operación deseada. (Espinoza y Lara, 1990)

#### 7.1.5. Ubicación

Se usan interruptores y fusibles para proteger los equipos y al personal. Los interruptores permiten cortar manualmente el flujo de corriente en caso de emergencia o para un mantenimiento programado. Los fusibles proporcionan protección contra sobrecorrientes en caso de cortocircuito o una falla a tierra. Se deben consultar las normas eléctricas correspondientes, por ejemplo al artículo 690 y 240 del código NEC.

Se instalan interruptores de seguridad para seccionar cada alamento del sistema EFD y la carga conectada.

● **Baterías.**- Se recomienda el fusible del tipo limitador de corriente, para la protección del banco de baterías.

● **Conjunto fotovoltaico y aerogenerador.**- Se deben instalar fusibles o interruptores entre el controlador de carga y el conjunto fotovoltaico así como entre controlador de

charge y el aerogenerador. Se usan interruptores o fusibles para protección del conjunto fotovoltaico y el aerogenerador. Si el conductor negativo del sistema EFD no está conectado a tierra (no recomendable) se debe instalar protección contra sobrecorriente tanto en el conductor positivo como en el negativo.

Usualmente se multiplica la corriente de cortocircuito del conjunto fotovoltaico por un factor de 1.25 para especificar la capacidad del fusible que se coloca entre el conjunto y el controlador.

● **Generador diesel-eléctrico.**- En el generador síncrono de la planta eléctrica debe estar provisto de un medio de protección contra sobrecorriente ya sea fusible o interruptor automático. Además debe contar con un interruptor que permita su accionamiento del resto del sistema.

● **Circuitos derivados.**- Los circuitos derivados deben estar provistos de un fusible o interruptor de capacidad adecuada.

● **Inversor.**- Tanto la entrada como la salida del inversor deben estar protegidos con fusibles o interruptores. También es recomendable la instalación de un interruptor de desconexión en los lados de c.a. y c.d. en caso de mantenimiento o de emergencia. Además el inversor debe contar con protección contra subtensiones o sobretensiones.

● **Controlador de carga.**- Se debe usar un fusible con una capacidad de 0.8 veces la corriente nominal del controlador entre la batería y el controlador.

## 7.2. PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES

Los dispositivos empleados para la protección contra sobretensiones son varistores conocidos comúnmente como apartarrayos. Los apartarrayos son dispositivos que tienen como objetivo la descarga de la sobrecorriente asociada a una condición de sobrevoltaje.

Un apartarrayos en su estado normal opera como un aislador. Cuando ocurre un impulso de alto voltaje, el apartarrayos se convierte en una trayectoria directa a tierra. El voltaje en que el apartarrayos pasa de su estado aislador a su estado conductor se conoce como voltaje de cebado o de flameo.

Los apartarrayos más utilizados son los de carburo de silicio (SiC) y los de óxido de zinc (ZnO), sin embargo también son usados los apartarrayos de gas.

### 7.2.1. Apartarrayos autovalvulares de carburo de silicio (SiC)

El apartarrayos autovalvular consiste básicamente en un entrehierro y una resistencia no lineal (varistor). El entrehierro aísla la línea de tierra en condiciones normales de operación y es capaz de descargar corrientes transitorias a tierra debidas a sobratensiones causadas por rayos.

No se debe confundir el flameo del apartarrayos con el arqueo. La tensión de flameo o cabado se refiere al comienzo del ciclo de protección del apartarrayos. El flameo ocurre cuando la sobratensión alcanza el valor al que se produce el arco en el entrehierro, para descargar la corriente a tierra.

El arqueo se refiere al arco eléctrico que se produce en la superficie exterior de la porcelana cuando se encuentra muy contaminada, o cuando por error de diseño, la corriente "brinca" los aislones del aislamiento bajo condiciones de lluvia.

Las tensiones de arqueo deben ser menores el nivel básico de aislamiento (NBA) del equipo.

La operación del apartarrayos se realiza en 3 etapas: 1) flameo; 2) descarga de la corriente transitoria a; 3) interrupción de la corriente posterior el transitorio.

### 7.2.2. Apartarrayos de óxido de zinc (ZnO)

En apartarrayos de óxido de zinc, debido al material con que se fabrican presentan mejores características de no linealidad que los de carburo de silicio, lo que hace factible no utilizar entrehierros permitiendo reducir su tamaño y peso.

La selección de este tipo de apartarrayos se basa en su máxima tensión continua de operación (MTOC), que es la tensión aplicada al dispositivo de línea a tierra. (Espinoza y Lara, 1990)

### 7.2.3. Apartarreyos de gas

Los apartarreyos de gas consisten en dos o más electrodos dentro de un dispositivo cerrado herméticamente, conteniendo un gas o una mezcla de gases a una presión menor a la atmosférica.

Este tipo de apartarreyos operen como unos tubos de descarga catódicos. Cuando el espacio entre los electrodos está sujeto a un campo eléctrico intenso debido a una onda de sobretensión, el gas se ioniza hasta que se rompe su rigidez dieléctrica produciéndose un arco que drena a tierra la sobrecorriente transitoria. (IEEE, 1992)

Algunos de los gases empleados en su fabricación son: el Argón, Helio, Hidrógeno, Nitrógeno, Cesio, Kriptón, entre otros.

### 7.2.4. Margen de protección

El margen de protección es el grado de protección que debe ofrecer el apartarreyos, proporcionando una diferencia entre el nivel básico de aislamiento (NBA) del sistema y la máxima tensión que puede aparecer en el apartarreyos, de al menos 20%.

La coordinación de aislamiento se define como la relación que debe existir entre la rigidez dieléctrica del equipo eléctrico y las características de los dispositivos de protección.

En la figura 7.1 se ilustra el concepto básico de la coordinación de aislamiento, donde A representa las características de rigidez dieléctrica del aparato que va a protegerse y la curva B las características de operación del dispositivo protector. Por lo tanto, la distancia  $d$  es el margen de protección (MP) que existe entre el equipo y el dispositivo de protección. Los equipos de protección deben soportar las pruebas de impulso normalizadas por la Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC).

### 7.2.5. Ubicación

Se utilicen apartarreyos para protección contra sobretensión. Si el sistema de c.d. no está conectado a tierra se deben usar apartarreyos en los conductores de ambas

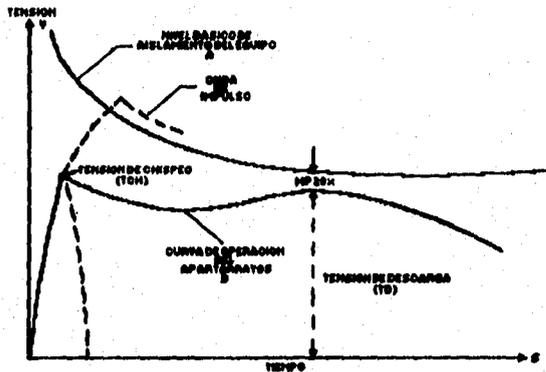


Figure 1.7. Coordinación de aislamiento.

polaridades.

El apartarrayos debe ser instalado lo más cerca posible del equipo a proteger. Se recomienda que el apartarrayos se encuentre cerca del inversor o del controlador de carga, o a la salida de las fuentes renovables si hay más de 20 metros entre éstas y el controlador. [Sandia, 1990]

Así mismo, debe procurarse que los conductores que conectan al apartarrayos con la línea y con el potencial de tierra sean lo más cortos y rectos posibles, evitando las curvas. El conductor debe ser de cobre con calibre no menor al No. 14 AWG (2.08 mm<sup>2</sup>) o de una capacidad de corriente equivalente si es de otro material adecuado, resistente a la corrosión. [Secofi, 1990]

Se debe conectar el apartarrayos al cable que une al portafusible con la línea de tal forma que la corriente de descarga no pase a través del fusible.

La instalación de apartarrayos puede hacerse tanto en el exterior como en el interior del local que contiene el equipo que se va a proteger. Cuando se instalen en el interior del edificio, deben estar alejados de las baterías, además de ser accesibles solamente a personal especializado.

### 7.3. PROTECCION CONTRA IMPACTO DIRECTO DE DESCARGAS ATMOSFERICAS

Para protección contra impacto directo de rayos se emplea una terminal aérea conocida comúnmente como pararrayos. El pararrayos puede ser una varilla de 0.25 a 6.1 metros de longitud con sección transversal de al menos 50 mm<sup>2</sup>. Puede estar constituido de cobre, aluminio, bronce o acero galvanizado. [Garza, 1994]

Los equipos que el pararrayos va a proteger deben estar situados dentro del volumen de protección que proporciona éste, según el concepto de la "esfera rodante".

Los electrodos y conductores de puesta a tierra tienen las mismas características que los elementos del sistema de tierras del sistema (ver capítulo 8, sistemas de tierras).

En zonas con alto nivel cerámico, deben considerarse los siguientes aspectos.

Los objetos situados dentro del volumen de protección del pararrayos tienen una probabilidad del 99.5% de que no ser impactados por descargas atmosféricas. [Garza, 1994]

Sin embargo, en las aspas del aerogenerador son de material conductor, la función del pararrayos se anula, debido a que éstas interceptarán los rayos.

En aspas metálicas los daños son menores comparados con las de fibra de vidrio, resina o madera. Donde el impacto de un rayo puede causar su destrucción. En estos casos se debe proporcionar un camino de baja resistencia por la superficie del aspa. Ello se realiza utilizando pintura metálica o mallas metálicas en la superficie aspa, o cinta conductora en los bordes de la misma.

#### ● Equipo electrónico

Para protección del equipo electrónico, se deben tomar en cuenta lo siguiente:

- El equipo electrónico debe estar alejado de los conductores de bajada, torre y otros soportes metálicos. De tal manera que el incremento de distancia implique un menor efecto del campo magnético.

- Si un equipo electrónico no puede ubicarse a distancia segura, se colocará en el centro de un arreglo asimétrico de conductores de bajada, en los cuales se cancelen mutuamente sus campos magnéticos sin afectar al equipo a proteger.
- Utilizar blindajes metálicos continuos y sellados herméticamente.
- Los sensores tales como anamómetros, piranómetros, perhalómetros, termohigrómetros, etc., no deben instalarse a lo largo de la torre.
- **Aerogenerador**

Cuando un rayo impacta al rotor aélico y la cubierta del generador no es metálica, se presentan daños en el alambrado de éste. Esto se evita si la cubierta del generador es de material conductor. [Garza, 1994]

## **CAPITULO 8**

# **SISTEMA DE TIERRAS**

---

### **8. SISTEMA DE TIERRAS**

El sistema híbrido debe contar con un sistema de tierras, al cual se deben conectar todos los elementos de la instalación que requieran la conexión a tierra.

#### **8.1. Funciones del sistema de tierras**

Las funciones principales del sistema de tierras son:

- Proporcionar un camino de muy baja impedancia para el flujo de corrientes debidas a una falla a tierra o a la operación del apartarrayos.
- Evitar que pueden producirse diferencias de potencial que puedan ser peligrosas para el personal (potencial de paso y de contacto).

#### **8.2. Descripción del sistema de tierras**

Los elementos del sistema de tierras son:

- Red o malla de conductores enterrados, a una profundidad que generalmente varía entre 0.5 y 1.0 metros.
- Electrodo de tierra, conectados a la malla y enterrados a la profundidad necesaria para obtener un valor mínimo aceptable de resistencia de tierra.
- Conductores de puesta a tierra, a través de los cuales se hace la conexión a tierra de las partes de la instalación o del equipo que requieran dicha conexión.

### 8.2.1. Malla

Se recomienda que el calibre de los conductores de la malla sean mínimo de 4/0 AWG (107.2mm<sup>2</sup>) y los conductores de puesta a tierra del equipo del equipo no deben ser menores al calibre No.2 AWG (33.6mm<sup>2</sup>). Dicha malla debe estar conectada a los electrodos de tierra de 2.50 metros de longitud como mínimo, clavados verticalmente.

### 8.2.2. Electrodo

Los electrodos pueden estar constituidos por un tubo, una berra o una placa enterrados.

- **Placa.**- Cada electrodo de placa debe tener por lo menos 2,000cm<sup>2</sup> de superficie en contacto con la tierra. Los electrodos de fierro o acero deben tener un espesor no menor de 6mm y los de metal no ferroso, no menor de 2mm.
- **Tubo.**- Los electrodos de tubo deben tener por lo menos 19mm de diámetro exterior y, son de fierro o acero, deben estar galvanizados.
- **Barra.**- Los electrodos de barra de acero o fierro deben tener por lo menos 1.6cm de diámetro (2.0cm<sup>2</sup> de sección transversal). Las barras de materiales no ferrosos deben tener un diámetro no menor de 1.27cm (1.26cm<sup>2</sup> de sección transversal).

Los electrodos de tubo o de barra deben tener como mínimo una longitud de 2.50 metros (generalmente se utilizan varillas de cobre de 3.05 metros de longitud).

Los electrodos de pararrayos deben estar separados por lo menos 1.8 metros de los electrodos del sistema de tierras. [Secofi, 1990]

La resistencia total de la malla con respecto a tierra se puede determinar por la expresión:

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}, \text{ en } \Omega$$

Donde:  $r$  = es el radio en metros de una placa circular equivalente, cuya área es la misma que la ocupada por la malla real de tierra.

$L$  = es la longitud total de conductores enterrados en metros.

$\rho$  = Es la resistividad eléctrica del terreno, en  $\Omega$ .

La resistencia eléctrica total del sistema de tierras debe ser menor a 10  $\Omega$ .

### 8.2.3. Conductores de puesta a tierra

La conexión del electrodo de tierra a los dispositivos del sistema y equipo puesto a tierra, debe hacerse por un solo conductor. Dicho conductor se instala entre el electrodo y el punto de unión o punto donde lleguen los conductores para puesta a tierra de dichos elementos.

Este puente de unión puede ser una barra o alambre grueso de cobre o de otro material con características similares.

El conductor del electrodo debe ser de cobre o de otro material conductor semejante pudiendo ser sólido o trenzado, aislado o desnudo.

Los conductores de puesta a tierra de equipos pueden estar constituidos por alguno de los siguientes medios:

- Un conductor de cobre u otro material similar, pudiendo ser sólido o trenzado, aislado o desnudo.
- Tubo metálico rígido.
- Algún otro medio aprobado para fines de puesta a tierra.

En sistemas de corriente directa el conductor de puesta a tierra no debe ser más delgado que el conductor más grueso empleado en el suministro eléctrico, o su

equivalente si no son del mismo material. En ningún caso al conductor de puesta a tierra debe ser menor al calibre No.8 AWG (8.37 mm<sup>2</sup>) de cobre. [Secofi, 1990]  
 En sistemas de corriente alterna el conductor del electrodo de tierra no debe ser menor al que se indica en la tabla 8.1. El calibre del conductor de puesta a tierra de equipos no debe ser menor al indicado en la tabla 8.2.

Calibre mayor del sistema AWG o MCM (cobre)	AWG o MCM (cobre)
2 ó menor	8
1/0	6
2/0 ó 3/0	4
4/0 a 350 MCM	2

Tabla 8.1

Capacidad nominal de protección contra sobrecorriente ubicada antes del equipo o conductor, en (A)	Calibre del conductor de puesta a tierra de cobre, (AWG o MCM)	Calibre del conductor de puesta a tierra de aluminio, (AWG o MCM)
15	14	12
20	14	12
30	12	10
40	10	8
60	10	8
100	8	6
200	8	4
400	4	2

Tabla 8.2

**8.3. Elementos aterrizados**

- Tanto el conductor de polaridad negativa así como el neutro generado por la planta electrógena deben estar conectados a tierra.
- Apartarrayos.- El conductor de puesta a tierra del apartarrayos puede conectarse a cualquiera de los siguientes elementos:
  - Al conductor del electrodo de tierra.
  - Directamente al electrodo de tierra.
- Pararrayos.- Es importante que los conductores y electrodos del pararrayos no se deben utilizar para la puesta a tierra de instalaciones y equipos eléctricos, debiendo tener su propio sistema de tierras.
- La referencia de tierra de los equipos electrónicos deben estar conectada a un sistema independiente al sistema general de tierras. Deberá considerarse un uso apropiado de los anclajes equipotenciales.
- Las conexiones a tierra para protección del personal se tratan más adelante en el capítulo de seguridad.

## CAPITULO 9

# OPERACION EN ESTADO ESTABLE

### 9. OPERACION EN ESTADO ESTABLE

El circuito eléctrico de un sistema híbrido de operación independiente, con una planta electrógena en paralelo con un inversor, se presenta en la figura 9.1.

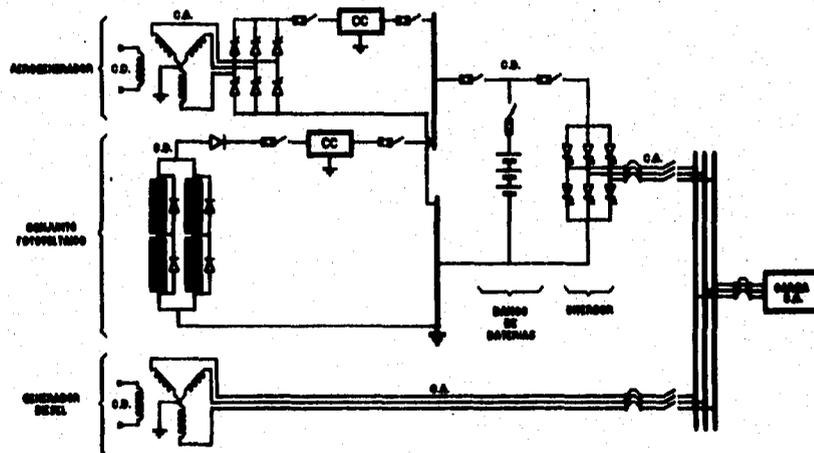


Figura 9.1. Diagrama eléctrico del sistema híbrido EFD.

Para poder analizar fácilmente dicho circuito, éste puede ser representado básicamente en un diagrama a bloques con sus componentes principales.

#### 9.1. DIAGRAMA A BLOQUES

El diagrama a bloques del sistema híbrido EFD analizado se muestra en la figura 9.2. En el diagrama se puede observar claramente que el alternador del motor diesel

suministra energía eléctrica paralelamente con el inversor a una carga de c.a. Este esquema presenta las siguientes ventajas:

- Un mejor suministro de potencia a la carga.
- Aumenta la confiabilidad del sistema.
- Permite la posibilidad de mantenimiento preventivo.
- Operación de la máquina diesel más eficiente en cuanto a consumo de combustible.
- Mínimo mantenimiento del motor diesel.

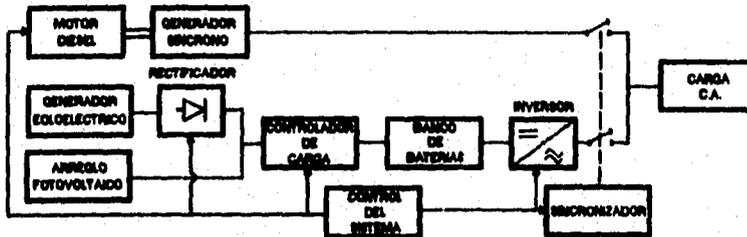


Figura 9.2. Diagrama a bloques del sistema híbrido FED con generador diesel en paralelo con inversor.

## 9.2. MODOS DE OPERACION

De acuerdo con el esquema, el sistema puede operar en uno de los siguientes modos:

- Operación del Inversor únicamente.
- Operación paralela del inversor y generador diesel.
- Operación paralela del inversor y generador diesel, con inversor efectuando como cargador de baterías.

El subsistema de control escoge la operación del inversor, si la capacidad del banco de baterías se encuentra arriba de un nivel mínimo. Si la carga aumenta arriba de un cierto valor, el motor diesel será encendido e introducido en paralelo con el inversor. Dependiendo del valor de la carga suministrada, el inversor podrá compartir la carga

o ser utilizado como un cargador de baterías. Cuando disminuye la carga a un valor predeterminado, el sistema de control regresará a la operación del inversor. Durante la operación continua, el controlador se encargará de administrar las fallas tales como caída de voltaje, pérdida de sincronización, averías en el inversor, etc.

### 9.2.1. Operación del inversor únicamente

El sistema está operando en este modo cuando el nivel del banco de baterías se encuentra arriba de un nivel mínimo de carga.

Debido a que el voltaje de entrada del inversor depende de la tensión de las baterías, éstas deben suministrar constantemente dicha tensión, ya que si se excede el nivel de tensión de entrada de c.d., al inversor podría ser dañado. Por ejemplo, una batería de 12 V completamente cargada pueda alcanzar una tensión de 16 V y un inversor de 12 V pueda averiarse si se le aplica una tensión de tal magnitud. [Sandia, 1990]

El factor de potencia está determinado por la carga conectada. Algunos tipos de inversoras cuentan con circuitos diseñados para compensar el valor del factor de potencia. La figura 9.3 muestra un inversor alimentando a un motor de inducción.

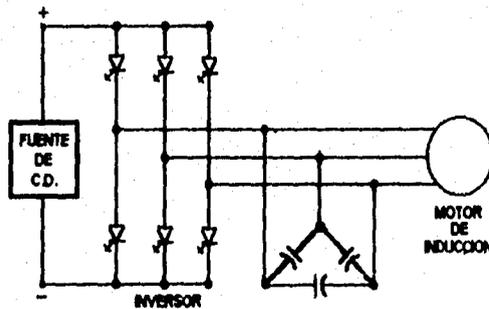


Figura 9.3. Inversor conectado a un motor de inducción.

El banco de capacitores tiene dos funciones principales, a) permitir la conmutación del inversor además de actuar como un filtro pasa-bajas; b) mejorar el factor de potencia.

La regulación de tensión en el inversor indica las variaciones del voltaje de salida. Los mejores equipos producen un valor de tensión eficaz (RMS) casi constante para una gran diversidad de cargas.

9.2.2. Operación paralela del inversor y generador diesel

Cuando un generador está conectado en paralelo con otro generador, la frecuencia y el voltaje en las terminales de ambas máquinas deben ser los mismos, puesto que sus terminales van unidas a un bus común. Por lo tanto, sus características de potencia real-frecuencia y potencia reactiva-voltaje pueden dibujarse espalda con espalda, quedando el eje vertical como eje común. La gráfica resultante en ocasiones suele denominarse "diagrama de casa". [Chapman, 1988]

Teniendo en cuenta lo anterior, aquí utilizaremos los diagramas de casa.

Debido a que el voltaje y la frecuencia en un inversor son independientes de la carga conectada, de acuerdo a lo visto en el apartado 4.2.1., las características de éste pueden ser representadas con una pendiente muy pequeña, como se muestra en la figura 9.4.

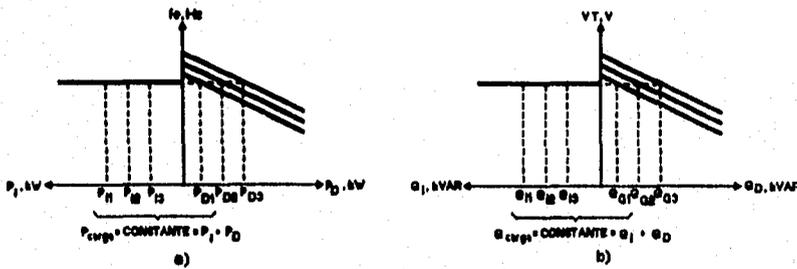


Figura 9.4. Diagrama de casa para el inversor y el generador diesel.

De acuerdo con la figura 9.4, cuando el generador diesel se conecta en paralelo con el inversor, la potencia real y reactiva caerá en función de la carga conectada. La potencia total entregada por el inversor y el generador sincrónico del motor diesel será:

$$P_{total} = P_{carga} = P_I + P_D$$

Donde  $P_i$  y  $P_D$  son las potencias reales entregadas por el generador síncrono y el inversor respectivamente. De manera similar la potencia reactiva total será:

$$Q_{total} = Q_{carga} = Q_i + Q_D$$

Si se inyecta más combustible al motor diesel, aumentará la potencia suministrada por el generador mientras que disminuye la potencia entregada por el inversor. Si se incrementa la corriente de campo del generador, se elevará la potencia reactiva  $Q$  suministrada por éste, mientras que disminuye la potencia reactiva entregada por el inversor.

Resumiendo, cuando un generador diesel opera en paralelo con un inversor, la frecuencia y el voltaje terminal quedan controlados por el inversor, la potencia real con el gobernador del motor diesel, y la potencia reactiva con el reóstato de campo.

Cuando el inversor y el generador diesel son de tamaños similares, la distribución de la carga se hace en partes iguales. Pero si tienen potencias distintas, la potencia reactiva y real de la carga se distribuye en forma proporcional a las potencias aparentes de cada uno. De esta manera se reducen las pérdidas por efecto Joule. La corriente suministrada en estas condiciones es también proporcional a su potencia aparente y operan el mismo factor de potencia de la carga alimentada. Por lo que las tensiones generadas son iguales y con el mismo desfaseamiento con relación al voltaje en terminales. [Enriquez, 1982]

#### ● Circuito equivalente.

Para obtener el circuito equivalente del sistema, se asume que la salida del inversor es comparable a la de una red de suministro eléctrico. De esta manera el inversor y el generador diesel pueden ser modelados como fuentes de voltaje en serie con sus impedancias (Ver figura 9.5). [Nayar, 1993]

El diagrama fasorial del sistema cuando están en operación simultánea el inversor y el generador diesel se muestra en la figura 9.6.

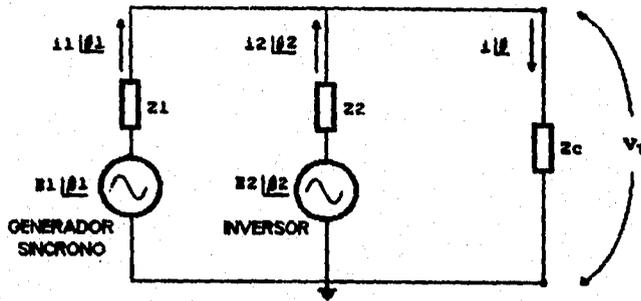


Figura 9.5. Circuito equivalente.

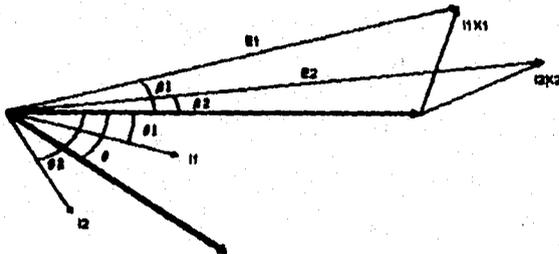


Figura 9.6. Diagrama fasorial del sistema.

La expresión general para la potencia aparente entre el generador diesel y el inductor está dada por:

$$S = \frac{E_1 E_2 \sin(\beta_1 - \beta_2)}{X_1 + X_2} - j \left[ \frac{E_1 E_2 \cos(\beta_1 - \beta_2)}{X_1 + X_2} - \frac{E_1^2}{X_1 + X_2} \right]$$

Se puede notar de la ecuación anterior que el flujo de potencia real es bidireccional dependiendo del valor de  $(\beta_1 - \beta_2)$ . Para una carga dada  $Z_c$ , la potencia suministrada por cada fuente puede ser controlada por la variación de  $\beta_2$  ó  $\beta_1$ , los ángulos relacionados con el inductor y el generador diesel, respectivamente. [Nayar, 1993]

• **Condiciones para la conexión en paralelo del inversor y el generador diesel.**

Se deben de seguir ciertas condiciones para conectar el generador diesel en paralelo con el inversor. Puesto que si el interruptor fuera cerrado arbitrariamente en cualquier instante, estarían expuestos a daños severos tanto el inversor como la máquina síncrona. Esto podría afectar en el suministro continuo de potencia eléctrica.

Para evitar este problema la conexión en paralelo deben de tenerse las siguientes condiciones:

- a) Los valores de los voltajes de línea de las dos fuentes deben ser iguales. Debido a que si las tensiones de los conductores que se conecten entre sí no son exactamente los mismos, se establecerán corrientes muy grandes al cerrar el interruptor.
- b) Las dos fuentes deben tener la misma secuencia de fases, o sea, el mismo sentido de rotación fasorial con velocidad angular  $\omega$ . Esto asegura que la secuencia con que los voltajes alcanzan su valor pico en las dos fuentes es la misma. Si la secuencia es diferente, aún a pesar de que un par de tensiones estén en fase (ver figura 9.7), los otros dos pares de voltaje están defasados  $120^\circ$ . Por lo que si el generador diesel y el inversor se conectan de este manera se producirían altas corrientes en las fases b y c, dañando a ambos equipos.

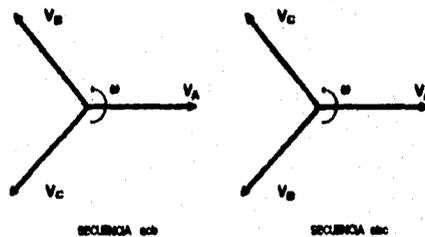


Figura 9.7. Secuencias de fase posibles de un sistema trifásico.

- c) Los ángulos entre fases deben ser iguales. La mejor forma de determinar que los dos sistemas estén en fase es utilizar un sincronoscopio. El sincronoscopio es un instrumento que mide la diferencia del ángulo de fase entre las fases "a" de los dos sistemas. Como las frecuencias de los dos sistemas son aproximadamente iguales, el ángulo de fase visto por el instrumento cambia lentamente. Si el generador, a más rápido que la velocidad  $w$  del inversor, el ángulo de fase avanza y la aguja del instrumento gira en sentido horario. Cuando la aguja ocupe la posición vertical ( $0^\circ$ ) los voltajes se encuentran en fase, pudiéndose accionar el interruptor para realizar la conexión en paralelo. Esta procedimiento se puede efectuar automáticamente por medio del sistema de control. Sin embargo, también puede realizarse manualmente.
- d) La frecuencia del generador diesel debe ser ligeramente mayor que la frecuencia del inversor. Si el generador se conecta a la línea teniendo una frecuencia ligeramente menor que la frecuencia de operación, la máquina consumirá potencia eléctrica, mientras se estabiliza el sistema. Para asegurar que el generador que se conecta a la línea suministre potencia, la frecuencia del generador debe ser levemente mayor a la del inversor. Si las frecuencias de los equipos no son aproximadamente iguales cuando se conectan, se producirán oscilaciones de potencia antes de que se estabilicen a una frecuencia común, con el consiguiente intercambio de corrientes peligrosas.

### **9.2.3. Operación paralela del inversor y generador diesel, con inversor actuando como cargador de baterías**

Cuando el inversor opera como un cargador de baterías, se comporta como un carga. Por lo que el suministro de energía eléctrica queda restringido al funcionamiento del generador diesel únicamente.

Puesto que el motor diesel está acoplado a un generador síncrono, éste debe de mantener la velocidad constante a cualquier tipo de carga conectada, ya que de otra forma la frecuencia del sistema estaría afectada. Como la máquina diesel mantiene constante la velocidad  $w$ , la magnitud del voltaje generado internamente en el alternador  $E_A = K\phi w$  es constante.

Al variar la carga, el comportamiento del generador síncrono es:

- Si el generador alimenta cargas inductivas el voltaje disminuye significativamente.
- Si al generador se le agregan cargas resistivas el voltaje presentará una ligera disminución.
- Si se le adicionan cargas capacitivas al voltaje en terminales aumenta.

En un generador síncrono la regulación de voltaje está dada por:

$$VR = \frac{V_{oc} - V_{pc}}{V_{pc}}$$

Donde:  $V_{oc}$  = Voltaje en vacío  
 $V_{pc}$  = Voltaje a plena carga

Generalmente es deseable que la tensión suministrada a una cierta carga permanezca constante, aún a pesar de las variaciones de la misma. Por lo que la manera más conveniente de hacerlo es variando la magnitud del voltaje interno  $E_A$  variando la corriente de campo.

Ahora bien, cuando aumenta la exigencia de potencia el generador diesel tiende a disminuir su velocidad de rotación. La disminución de velocidad no es lineal pero generalmente se cuenta con mecanismos gobernadores que hacen lineal el descenso de velocidad respecto a la demanda de potencia.

Cualquiera que sea el tipo de mecanismo gobernador del primotor diesel, siempre se ajusta de manera que produzca una característica ligeramente descendente cuando la carga aumenta. La caída de velocidad del primotor se define por medio de la ecuación:

$$SD = \frac{n_{oc} - n_{pc}}{n_{pc}} (100\%)$$

Donde:  $n_{oc}$  = Velocidad de la máquina diesel sin carga  
 $n_{pc}$  = Velocidad de la máquina diesel a plena carga

Como la velocidad está relacionada directamente con la frecuencia eléctrica del sistema de acuerdo con:

$$f = \frac{\eta P}{120}$$

La relación entre frecuencia y potencia puede describirse por medio de la ecuación:

$$P = Sp (f_{sc} - f_{sa})$$

Donde:  $P$  = Potencia de salida del generador  
 $f_{sc}$  = Frecuencia del generador en vacío  
 $f_{sa}$  = Frecuencia del sistema  
 $Sp$  = Pendiente en kW/Hz

También es posible relacionar de manera similar la potencia reactiva  $Q$  y el voltaje en terminal del sistema.

$$Q = Sp (V_{Tsc} - V_{sa})$$

Donde:  $Q$  = Potencia reactiva del generador  
 $V_{Tsc}$  = Frecuencia del generador en vacío  
 $V_{sa}$  = Frecuencia del sistema  
 $Sp$  = Pendiente en kW/Hz

Debido a que el inversor funciona como cargador de baterías y el generador es la única fuente de generación de energía eléctrica, la potencia real  $P$  y reactiva  $Q$  estarán determinadas por la carga total conectada al generador. Por lo tanto, para una determinada potencia real, las posiciones del gobernador controlan la frecuencia del sistema,  $f_{sa}$ ; y para una cierta potencia reactiva, la corriente de campo regula el voltaje terminal del generador,  $V_T$ .

Resumiendo, cuando el inversor funciona como cargador de baterías y el generador es la única fuente generatriz, entonces:

- La potencia real y reactiva serán aquellas magnitudes determinadas por la demanda de la carga total del sistema.

- La posición del gobernador del generador controlará la frecuencia del sistema.
- La magnitud de la corriente de campo regulará el voltaje terminal del sistema.

Los generadores tienen mayor rendimiento cuando funcionan cerca de su punto de carga máxima (típicamente de 80 a 90 por ciento de la capacidad nominal). Se debe emplear para cargar rápidamente al banco de baterías desde 20% hasta 70% de su estado de carga.

### 9.3. OPERACION EN C.D.

La corriente operacional total de la batería cuando el sistema trabaja en los modos de inversor e inversor con máquina diésel en paralelo, está dada por:

$$I_{BB} = I_{FV} + I_{AG} - I_I$$

Donde:

- $I_{BB}$  = Corriente operacional total de la batería
- $I_{FV}$  = Corriente del conjunto fotovoltaico
- $I_{AG}$  = Corriente del aerogenerador
- $I_I$  = Corriente del inversor

La corriente operacional total de la batería cuando el sistema opera en el modo de motor diésel como cargador de baterías, está dada por:

$$I_{BB} = I_{FV} + I_{AG} + I_{GD}$$

Donde:

- $I_{BB}$  = Corriente operacional total de la batería
- $I_{FV}$  = Corriente del conjunto fotovoltaico
- $I_{AG}$  = Corriente del aerogenerador
- $I_{GD}$  = Corriente del generador diésel-eléctrico

## CAPITULO 10

# OPERACION EN ESTADO TRANSITORIO

---

### 10. OPERACION EN ESTADO TRANSITORIO

#### 10.1. TRANSITORIOS DEBIDOS A SOBRECORRIENTES

##### 10.1.1. Arranque de motores

Los motores de inducción si se conectan directamente a la línea pueden causar caídas de voltaje en el generador síncrono debido a su corriente de arranque.

Con el fin de evaluar la corriente del motor en el instante del arranque, los motores de inducción jaula de ardilla tienen una letra código que establece la magnitud de corriente que pueda absorber del sistema en el momento de arranque; algunas de éstas se muestran en la tabla 10.1.

Letra código	kVA con rotor frenado/hp
A	0.00 - 3.15
B	3.15 - 3.55
C	3.55 - 4.00
D	4.00 - 4.50
E	4.50 - 5.00
F	5.00 - 5.60

Tabla 10.1

Se puede observar que los datos de la tabla anterior están en términos de la potencia aparente (kVA) por caballo de fuerza (Hp) para cada letra del código.

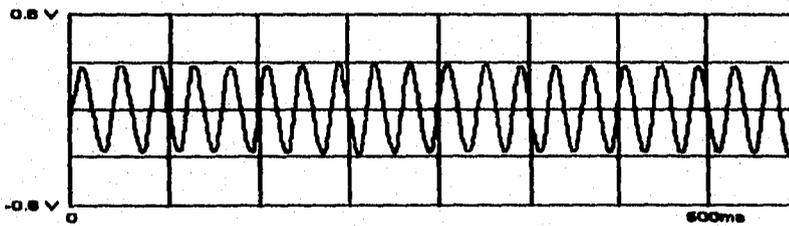
Para determinar la corriente de arranque de un motor de inducción se leen de la placa de datos el voltaje nominal, caballos de fuerza y letra código. La potencia aparente de arranque consumida por el motor será:

$$S_{arr} = (\text{Caballos de fuerza})(\text{Letra código})$$

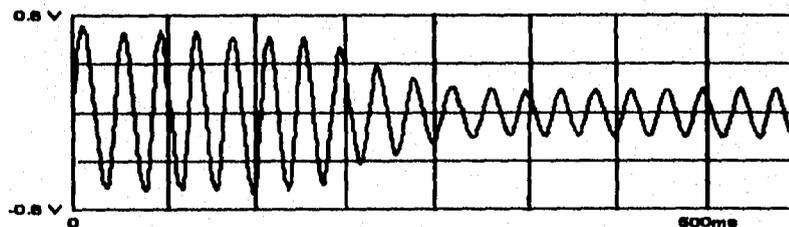
y la corriente de arranque se pueda determinar por medio de la ecuación:

$$I_{arr} = \frac{S_{arr}}{\sqrt{3} V_T}$$

En algunas ocasiones es necesario limitar la corriente de arranque introduciendo inductancias y/o resistencias al circuito del rotor, con la finalidad de evitar caídas de tensión o incluso la interrupción del suministro de energía eléctrica.



a) Tensión del inversor



b) Corriente de arranque

Figura 10.1

En la figura 10.1 se tienen las formas de onda de tensión y corriente de un inversor PWM de 2.5 kW, con regulación de voltaje de  $\pm 3\%$ , conectado a un motor de inducción de 0.5 Hp. [Naysr, 1993]

Se puede observar en la figura 10.1 b) que la corriente de arranque se completa a 9 ciclos, con una caída de tensión mínima. En general los inversores pueden generar una forma de onda comparable a la de una red de suministro de potencia eléctrica.

### 10.1.2. Cortocircuito en c.a.

Debido a que las fallas en el sistema son condiciones anormales de los circuitos, es necesario conocer la magnitud de la corriente de corto circuito para llevar a cabo una correcta protección de éste.

El tipo de fallas que pueden presentarse en el sistema son:

- *Fallas de una línea a tierra.*- ocurren cuando un conductor cae a tierra o hace contacto con el neutro.
- *Fallas de línea a línea.*- ocurren cuando dos líneas son cortocircuitadas.
- *Fallas de doble línea a tierra.*- ocurren cuando dos conductores son conectados a tierra o cuando dos conductores hacen contacto con el neutro del sistema.
- *Falla trifásica.*- ocurren cuando las tres fases del sistema son cortocircuitadas.

Con excepción de la falla trifásica, todas las demás son simétricas. Las fallas de este tipo son analizadas por la aplicación del método de las componentes simétricas. Este método es útil para resolver problemas de sistemas polifásicos desbalanceados en términos de sistemas balanceados. Una de las ventajas que presenta el método es que puede ser analizado el sistema en base a una sola fase.

El método permite descomponer el sistema desequilibrado en tres sistemas trifásicos balanceados, los cuales se pueden resolver independientemente y los resultados se pueden combinar dependiendo del tipo de falla.

Los sistemas son:

- *Sistema de secuencia positiva (1).*- Consiste en tres fasores de igual magnitud y defasados  $120^\circ$  cada uno, cuya secuencia de fases es igual a la del sistema desequilibrado.
- *Sistema de secuencia negativa (2).*- Consiste en tres fasores de igual magnitud y defasados  $120^\circ$ , cuya secuencia de fases es opuesta a la del sistema desequilibrado.
- *Sistema de secuencia cero (0).*- Consiste en tres fasores de igual magnitud y ángulo.

Las ecuaciones que se desprenden de dicho método son aplicables a cualquier sistema que pueda ser reducido a su equivalente Thevenin. Las expresiones para obtener las magnitudes de corriente de corto circuito para varios tipos de fallas a través de una impedancia de falla ( $Z_f$ ) son:

- **Falla trifásica.**

$$I = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f}$$

- **Falla de línea a línea.**

$$I = \frac{\sqrt{3}V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f}$$

- **Falla de línea a tierra.**

$$I = \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + Z_f}$$

- **Falla de doble línea a tierra.**

$$I = \sqrt{3}V_f \frac{Z_0 + 3Z_f - aZ_2}{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2)(Z_0 + 3Z_f)}$$

Donde:

- $I$  = Valor rms de la corriente alterna simétrica en estado estable que fluye al punto de la falla.
- $V_f$  = Valor rms del voltaje de línea a tierra en estado estable en el punto de falla, antes de ocurrir la falla.
- $Z_f$  = Impedancia de falla asociada al tipo de falla.
- $Z_1, Z_2$  y  $Z_0$  = Impedancias de secuencia positiva, negativa y cero del sistema vistos desde la falla.

Para la aplicación correcta de los dispositivos de protección es necesario conocer los niveles de corriente de falla mínima y máxima, y por lo tanto, el valor de la impedancia de falla ( $Z_f$ ). Los valores comúnmente usados para líneas de distribución oscilan entre 5 y 25 ohms, para líneas rurales se recomienda generalmente usar 40 ohms. [Espinosa y Lara, 1980]

Los diagramas de secuencia positiva, negativa y cero del sistema analizado se muestran en la figura 10.2.

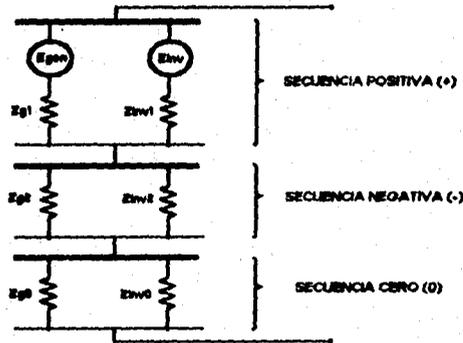


Figura 10.2. Diagramas de secuencia.

El circuito equivalente del inversor y generador diesel (mostrado en la figura 9.5) pueda ser simplificado utilizando el teorema de Millman. Esto se hace con la finalidad de observar el comportamiento del sistema cuando se presenta una falla en una fase (ver figura 10.3).

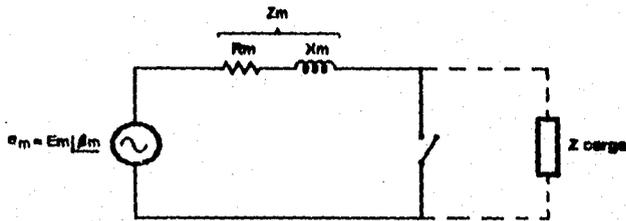


Figura 10.3. Circuito equivalente de Millman.

Donde:

$$e_m = \frac{e_{gen} Z_{inv} + e_{inv} Z_{gen}}{Z_{gen} + Z_{inv}} = E_m \sin \omega t$$

$$Z_m = \frac{Z_{inv} Z_{gen}}{Z_{inv} + Z_{gen}}$$

Aplicando la ley de kirchhoff de voltaje se tiene la siguiente ecuación:

$$E \sin(\omega t + \beta) = Ri + L \frac{di}{dt}$$

Donde:

- R = Resistencia del circuito.
- L = Inductancia del circuito.
- i = Corriente instantánea después de cerrar el interruptor.
- E = Valor pico del voltaje senoidal de alimentación.
- $\omega$  = Velocidad angular.
- $\beta$  = Defasamiento angular del voltaje cuando ocurre la falla.

La solución de la ecuación diferencial está dada por la siguiente expresión:

$$i = [A e^{-\alpha t} + B \sin(\omega t + \theta)]$$

Donde:

$$A = \frac{X \cos \beta - R \sin \beta}{R^2 + X^2}$$

$$B = \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

$$\tan \theta = \frac{\cos \beta - (R/X) \sin \beta}{\sin \beta + (R/X) \cos \beta}$$

El primer término es la parte transitoria y el segundo es la parte estable.

El segundo término es una función senoidal, cuyo valor pico es el voltaje de alimentación dividido entre la magnitud de la impedancia del sistema visto desde el punto de falla.

Para tener una visión mejor del significado de las componentes transitorias y de estado estable se ilustra considerando un ejemplo real. Suponiendo un circuito con una relación  $X/R = 5$ ; la frecuencia de alimentación es 60Hz ( $\omega = 377$ ) y el interruptor cierra a  $20^\circ$  sobre la onda de voltaje.

La figura 10.4 muestra la forma de onda del voltaje de alimentación y las curvas correspondientes a las componentes de c.a., c.d. y la corriente total de falla.

Donde:

$$E = 100 \text{ volts, } X = 10, R = 2 \text{ y } X/R = 5$$

$$\Theta = 20^\circ = 0.349 \text{ radianes}$$

$$\omega = 377 \text{ radianes/segundo}$$

$$\phi = \tan^{-1} (X/R) = 78.7^\circ$$

$$i = 9.8 \sin (377 t - 1.024) + 8.37 e^{-75.4t}$$

En la figura 10.4 el primer pico de la corriente de falla total, es aproximadamente 1.5 veces el valor pico de la componente de c.a. de estado estable. En este punto, las fuerzas magnéticas sobre el equipo de protección son aproximadamente 2.25 veces, es decir  $(1.5)^2$ .

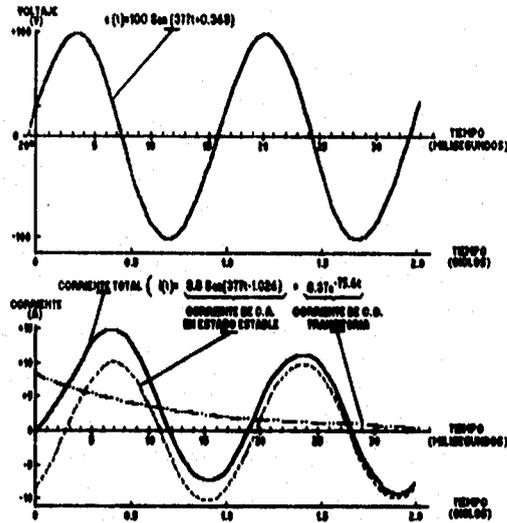


Figura 10.4. Forma de onda del voltaje de alimentación y curvas correspondientes a las componentes de c.a., c.d. y corriente total de falla.

En el diseño y aplicación de dispositivos de protección sujetos a corrientes de falla, tanto el transitorio como la falla de estado estable deben considerarse.

Los efectos de asimetría son dependientes únicamente de la relación  $X/R$  del circuito. Para la condición de máxima asimetría el valor rms del primer pico de corriente puede llegar hasta 1.7492 del valor de corriente simétrica en estado estable. Normalmente se utilizan valores rms, sin embargo no siempre es aplicable a una onda de corriente asimétrica. Por lo que para calcular su valor rms se relacionan el valor  $I$  rms de la corriente estable entre el valor  $I'$  rms de la corriente total ( $I'/I$ ). [Espinosa y Lara, 1990]

Para cualquier valor de  $X/R$ , la relación  $I'/I$  puede ser maximizada con respecto al ángulo  $\beta$ , y encontrar en forma rápida, conociendo el valor de  $X/R$ , la asimetría de la onda senoidal (ver figura 10.5).

La gráfica de la figura 10.5 es útil para la selección de fusibles, ya que estos se abren en el primer paso por cero de la corriente de falla.

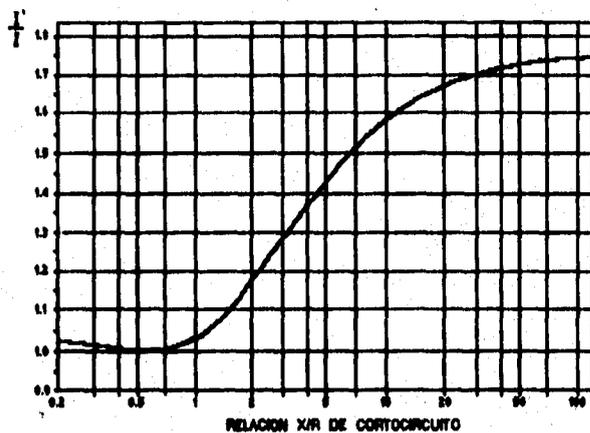


Figura 10.5. Relación entre X/R e I'/I.

### 10.1.3. Cortocircuito en c.d.

#### ● Cortocircuito en el banco de baterías

Cualquier batería puede suministrar cientos de amperes durante un corto período de tiempo, si se cortocircuitan sus terminales.

Por tal motivo es indispensable el cálculo de la magnitud de corriente de cortocircuito proporcionada por el banco de baterías.

La intensidad de cortocircuito proporcionada por la batería se puede calcular de la siguiente forma:

$$I_{cc} = \frac{V_b}{n R_i + R_o}$$

- Donde:
- $V_b$  = Tensión de la batería, en V.
  - $n$  = Número de elementos conectados en serie.
  - $R_i$  = Resistencia interna de los elementos conectados en paralelo, en ohms.
  - $R_o$  = Resistencia externa de la vía de cortocircuito, en ohms.

**● Cortocircuito en el aerogenerador**

Los generadores de inducción pueden contribuir a la corriente de falla sí, están equipados con capacitores. Sin embargo su contribución será moderada en magnitud y corta en duración. La mayoría de los generadores de inducción operan sin aterrizamiento y como resultado no tienen contribución en secuencia cero a la corriente de falla.

En cambio los alternadores conectados en estrella aterrizada son capaces de suministrar corrientes de secuencia cero, positiva y negativa. Los aerogeneradores de este tipo pueden contribuir a la corriente de falla debido a las características particulares del generador y del sistema de excitación. La condición transitoria más severa que puede ocurrirle al generador eléctrico del aerogenerador es el cortocircuito trifásico. En el generador cortocircuitado se presentan componentes de c.a. y c.d. de corriente.

Los componentes de c.d. se extinguen rápidamente, pero inicialmente pueden llegar a alcanzar el 50 ó 60 por ciento de la magnitud de la componente de c.a. un instante después de la falla. De esta forma, la corriente inicial total llega a ser típicamente 1.5 ó 1.6 veces la magnitud de la corriente alterna sola. [Chapman, 1988]

La figura 10.6 presenta la componente simétrica alterna de la corriente de falla, la cual puede dividirse en tres periodos:

● *Periodo subtransitorio.* - En este periodo la corriente subtransitoria  $I''$  es muy grande y disminuye rápidamente. Esta corriente es ocasionada por el arrollamiento amortiguador del generador. Dicha corriente puede alcanzar valores de hasta 10 veces el valor de la corriente estacionaria de falla.

● *Periodo transitorio.* - Luego de concluir el periodo subtransitorio, la corriente sigue disminuyendo más lentamente, durante dicho periodo, la corriente eficaz que circula por el generador  $I'$  es causada por una componente de cc inducida en el circuito de campo en el instante del cortocircuito. Esta corriente de campo aumenta el voltaje interno generado y aumenta la corriente de falla. La corriente eficaz promedio del

período estacionario puede alcanzar valores iguales a 5 veces la magnitud de la corriente estacionaria de falla.

● *Período estacionario.*- Después del período transitorio, la corriente de falla alcanza su condición de estado estacionario, conocida comúnmente como  $I_{ss}$ . Durante una falla permanente, la sobrecorriente de régimen estable puede alcanzar valores del 250% de la corriente de plena carga, debido a la acción del excitador.

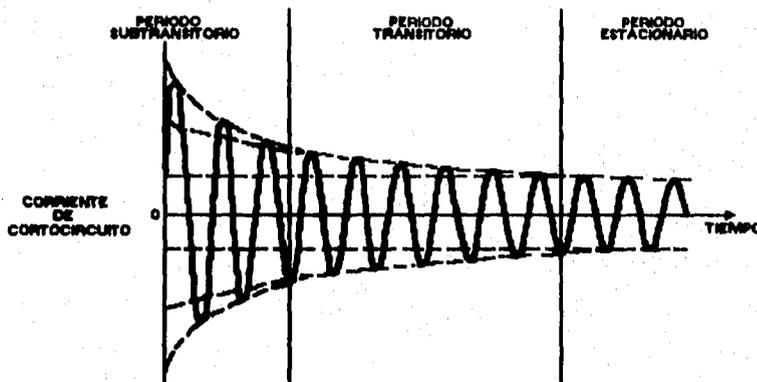


Figura 10.6. Componente simétrica alterna de la corriente de falla.

Durante el primer o segundo ciclo de la falla, la contribución de un generador síncrono a un cortocircuito alcanza su valor mayor y se determina mediante la reactancia subtransitoria. Esta reactancia está definida por la siguiente expresión:

$$X'' = \frac{E_A}{I''}$$

Durante algunos ciclos después, su contribución está determinada por la reactancia transitoria del generador, que viene dada por la expresión:

$$X' = \frac{E_A}{I'}$$

Finalmente, la corriente caerá dentro de un régimen estable determinado por la reactancia síncrona y el voltaje interno mantenido por el excitador de campo. Dicha corriente está definida por la siguiente ecuación:

$$I_{SS} = \frac{E_A}{X_S}$$

La magnitud eficaz de la corriente en cualquier instante posterior a la falla es:

$$I(t) = (I'' - I')e^{-t/T''} + (I' - I_{SS})e^{-t/T'} + I_{SS}$$

Donde:

- $I'$  = Corriente transitoria.
- $T'$  = Constante de tiempo del estado transitorio.
- $I''$  = Corriente subtransitoria.
- $T''$  = Constante de tiempo del estado subtransitorio.
- $I_{SS}$  = Corriente de estado estacionario.

#### • Cortocircuito en el conjunto fotovoltaico

La corriente de cortocircuito está determinada por la curva característica I-V de los módulos (ver figura 1.1 b). Dicha corriente puede ser proporcionada por el fabricante de los módulos fotovoltaicos.

## 10.2. TRANSITORIOS DEBIDOS A SOBRETENSIONES

Las sobretensiones que se presentan en el sistema híbrido EFD, de acuerdo con las causas que las producen, se pueden clasificar en:

- Sobretensiones de origen externo.
- Sobretensiones de origen interno.

### 10.2.1. Sobretensiones de origen externo

El potencial eléctrico del aire en tiempo despejado es positivo con respecto a tierra, también se observa que dicho potencial disminuye con la altitud.

Existe una diferencia de potencial permanente entre la tierra y la atmósfera y debido a que la tierra no es un buen conductor, su potencial en la superficie no es igual en todos los puntos del globo terráqueo.

Una descarga atmosférica se presenta cuando una o un conjunto de nubes se encuentra a un potencial elevado con respecto a tierra, de tal manera que el dieléctrico que hay entre estas dos masas, aire en este caso, se destruye. El movimiento de iones del aire a la tierra producen un flujo eléctrico que se manifiesta particularmente en los puntos agudos de la superficie de la tierra.

El primer proceso de una descarga atmosférica es la elevación del gradiente de potencial en el aire inmediato que rodea la nube; esta primera ruptura del dieléctrico ocasiona un efecto corone conocido como flujo o corriente piloto. Este flujo ioniza el aire, repitiéndose el proceso varias veces hasta que se crea un camino que ocasiona un arco continuo, el cual tiene forma zigzagueante y es en este preciso momento cuando se inician los fenómenos visibles de un rayo. Los rayos describen una trayectoria bastante sinuosa, además está formado por una línea principal y numerosas ramificaciones. La descarga que produce el rayo es oscilatoria, o sea que en lugar de una sola, se presentan varias que van de la nube a la tierra y de la tierra a la nube (ver figura 10.7). [Espinoza y Lera, 1990]

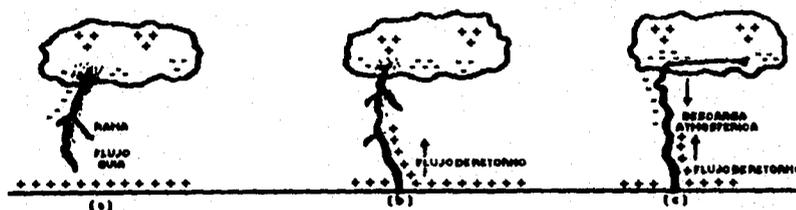


Figura 10.7. Formación de una descarga atmosférica.

La corriente o flujo piloto es en realidad un camino o rute ionizada, o sea, una ruptura completa del aislamiento. Consecuentemente, cuando ésta alcanza tierra forma un paso o rute para un flujo inverso.

Las descargas pueden ser simples o múltiples, con duración de 0.2 milisegundos y la diferencia de potencial que origina la descarga puede llegar a alcanzar  $10^6$  volts. Se

ha observado que el 60% de los relámpagos llevan a tierra electricidad con polaridad negativa y un 40% con polaridad positiva. [Espinosa y Lara, 1990]

Las sobretensiones de origen externo son causadas por descargas atmosféricas y tomen usualmente la forma de un impulso unidireccional; la amplitud máxima posible de la onda no tiene ninguna relación con el voltaje de operación del sistema. Este tipo de sobretensiones son las de menor duración pero las más severas y pueden deberse a las siguientes causas:

- Descargas atmosféricas directas.
- Voltajes inducidos por descargas atmosféricas que ocurren cerca de la línea.
- Sobrevoltajes inducidos electrostáticamente, causados por nubes cargadas eléctricamente o por fricciones entre pequeñas partículas de polvo presentes en la atmósfera.

Si la descarga cae directamente en el sistema, la potencia que debe ser disipada lo más pronto posible es del orden de  $10^{10}$  kW aproximadamente. Sin embargo, la mayor parte de las descargas no inciden directamente sino en punto cercanos al sistema, produciéndose voltajes inducidos.

Las ondas producidas por los fenómenos antes mencionados pueden ser representados por la siguiente ecuación:

$$e_{atm} = E (e^{-at} - e^{-bt})$$

Donde a y b son constantes que determinan la forma de la onda. [Espinosa y Lara, 1990]

Cuando las descargas inciden directamente en los circuitos, se producen tensiones transitorias excesivas en el sistema. Las tensiones transitorias viajan a través de éste pudiendo producir fallas de aislamiento en el equipo sino están debidamente protegido. Además los potenciales instantáneos son capaces de producir arcos entre los circuitos eléctricos y electrónicos de las diferentes fuentes generadoras.

Un dato importante para el diseño de sistemas autónomos rurales son los niveles cerámicos, es decir, el número promedio de días de tormentas eléctricas anuales.

La probabilidad de ocurrencia de una descarga atmosférica eléctrica se muestra en la figura 10.8.

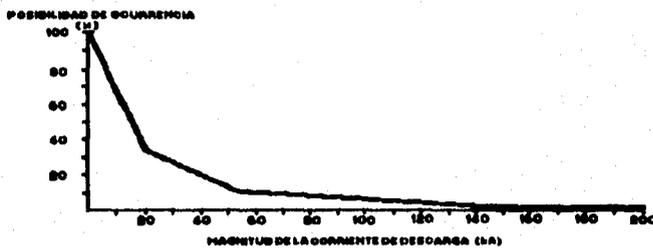


Figura 10.8. Probabilidad de ocurrencia de una descarga eléctrica.

Además si la instalación del sistema se encuentra rodeada de construcciones y/o árboles, éstos puedan interceptar un alto número de impactos directos por rayos. Esto se conoce como factor de blindaje. [Garza, 1994]

Sin embargo, aunque se proporcione un camino de baja impedancia eléctrica para derivar las sobrecorrientes a tierra, se pueden presentar daños severos sobre los equipos electrónicos debido a las siguientes causas:

- El campo electrostático entre las nubes y tierra originen pequeñas cargas eléctricas capaces de dañar circuitos electrónicos.
- El campo magnético asociado a la corriente del reyo, induce sobrevoltajes que pueden afectar los circuitos electrónicos.
- El campo eléctrico producido por la inductancia propia de la torre y conductores de bajada al circular la sobrecorriente de la descarga atmosférica, presenta diferencias de potencial peligrosos que pueden quemar circuitos, perforar aislamientos o producir arcos entre equipos electrónicos ubicados a diferentes alturas sobre la torre.

### 10.2.2. Sobretensiones de origen interno

Las sobretensiones de origen interno se deben principalmente a la operación de dispositivos de desconexión del sistema. Estos son de corta duración (2 a 3 ciclos) y alcanzan valores de 2 a 3 veces la tensión de operación del sistema.

Las sobretensiones de origen interno pueden ser clasificadas por su frecuencia en:

- *Sobretensiones internas de alta frecuencia.*- son causadas cuando se modifica el estado estable del sistema ya sea por seccionamiento o por falla.
- *Sobretensiones internas de baja frecuencia.*- se presentan a frecuencia nominal del sistema (60 Hz) como resultado de la desconexión de la carga o el seccionamiento de alguna carga parcial considerable.

**Sobretensiones por falla.**- Las sobretensiones por operación de dispositivos de desconexión se deben principalmente a falla ocurridas en el sistema pudiendo ser, por ejemplo de línea a línea, trifásica, dos líneas a tierra o de línea a tierra. Siendo ésta última la más severa en cuanto a sobretensiones se refiere.

Las condiciones que se presentan en una falla de línea a tierra son:

$$I_b = I_c = 0 ; V_e = 0$$

Del análisis de las componentes simétricas se tiene que los voltaje en los fases no dañadas son:

$$V_b = E_a \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\frac{X_0}{X_1} - 1}{\frac{X_0}{X_1} + 2} \right)$$

$$V_c = E_a \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{X_0 - 1}{X_1} - \frac{X_0 + 2}{X_1} \right)$$

Se observa de las ecuaciones anteriores que las tensiones que se presentan bajo esta condición de falla en las fases no dañadas dependen solamente de la relación de las reactancias  $X_0/X_1$ . Dando valores a  $X_0/X_1$ , se tiene la tabla 10.2. En la tabla, se aprecia que la sobretensión interna máxima que se puede presentar en las fases no falladas del sistema, para valores de reactancia  $X_0/X_1$ , fluctúan entre valores de 1 a 10, no siendo mayores de 1.50 veces el valor del voltaje nominal en fases antes de la falla. Por tal motivo, la protección contra sobretensiones se enfoca principalmente a las de origen externo, que son las más severas, debido a su magnitud. Sin embargo las impedancias de secuencia cero y positiva dan lugar al "coeficiente de aterrizamiento" que se debe tomar en cuenta para la selección del apartarrayos.

$X_0/X_1$	$V_b ; V_c$
1	1.00
3	1.25
10	1.50
-10	2.03
0	0.66

Tabla 10.2

**Sobretensiones por conmutación.**- La salida o entrada de los módulos fotovoltaicos y del aerogenerador producen sobretensiones transitorias en el lado de c.d. del sistema EFD debidas a dicha conmutación. El circuito que represente dicha situación se muestra en la figure 10.9 a).

Aplicando la ley de Kirchhoff, se tiene:

$$E = Ri + L \frac{di}{dt}$$

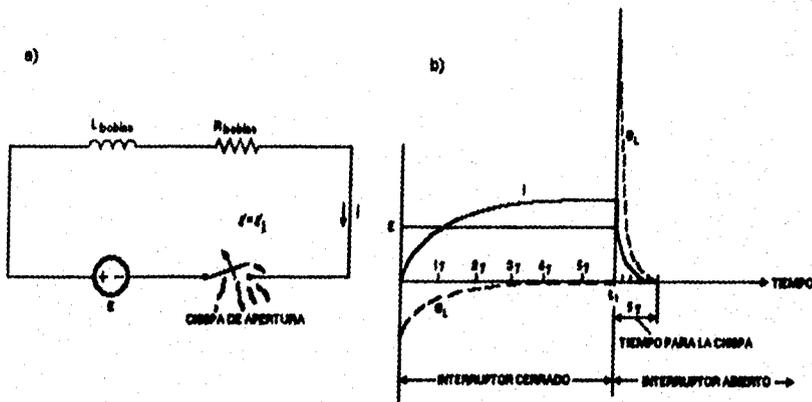


Figura 10.9. Comportamiento de la corriente y tensión inducido en un circuito inductivo cuando se cierra y se abre el interruptor

La solución de esta ecuación diferencial es:

$$i = I(1 - e^{-t/\tau})$$

siendo  $\tau = L/R$ ,  $I = E/R$ .

La constante de tiempo  $\tau$  es el tiempo que tardaría la corriente  $i$  en alcanzar el 63.2% de su valor estacionario  $I$ , ya que para  $t = \tau$  se tiene:

$$I = I(1 - e^{-1}) = I(1 - \frac{1}{e}) = I(1 - \frac{1}{2.718}) = 0.632I$$

al cabo de  $t = 5\tau$ ,  $i$  rebasa el 99%. Es usual tomar como tiempo de estabilización el intervalo de 5 constantes de tiempo  $\tau$ . [Hubert, 1985]

Cuando se abre un circuito que tiene un alto comportamiento inductivo, tal como en el caso de los devanados de campo del aerogenerador, el efecto inductivo evita que la corriente caiga instantáneamente a cero; el arco que se forma a través del interruptor puede quemar sus contactos. A menos que haya una protección adecuada, estos arcos y la destrucción de los interruptores y contactos pueden ocasionar problemas serios en el sistema. Los arcos y encendidos severos que ocurren cuando

el interruptor se abre, son ocasionados por la liberación repentina de energía almacenada en el campo magnético. [Hubert, 1985]

El colapso del campo magnético, ocasionada por la apertura del circuito, genera un voltaje de autoinducción el cual se opone a la disminución de la corriente.

Si cuando el interruptor se abre, la tensión de autoinducción es mayor que el nivel básico de aislamiento éste pueda dañarse.

En el instante en que el interruptor se cierra, la corriente es cero y la tensión inducida será igual en magnitud, pero opuesta en dirección al voltaje entregado por las fuentes de c.d.

La corriente aumenta con el tiempo, aproximándose a su valor estacionario en cinco constantes de tiempo; en este tiempo el voltaje opuesto de autoinducción se aproxima a cero.

Cuando el circuito se abra, el rápido colapso del flujo magnético induce un voltaje en dirección opuesta al decremento de la corriente. Por lo tanto, la tensión de autoinducción está en la misma dirección de la tensión de excitación; este actuará como un incremento de voltaje en lugar de una caída de voltaje.

Cuando el interruptor abre, la constante de tiempo es mucho menor que cuando el interruptor se cierra. La apertura del interruptor hace incluir la resistencia del arco eléctrico en serie con la resistencia del circuito. Cuando el interruptor se cierra, la constante de tiempo es:

$$\tau = \frac{L_{\text{bobina}}}{R_{\text{bobina}}}$$

Cuando se abre el circuito, la constante de tiempo es:

$$\tau' = \frac{L_{\text{bobina}}}{R_{\text{bobina}} + R_{\text{ARCO}}}$$

La constante de tiempo menor causa una caída más rápida en la corriente. Por lo que, la tensión inducida cuando se abre el interruptor es mayor que la tensión inducida cuando el interruptor se cierra.

Aunque la resistencia del arco no es constante (no lineal), las curvas que se muestran en la figura 10.9 b) son representativas del comportamiento de la tensión inducida, cuando se cierre y se abre el interruptor.

### 10.3. FERRORESONANCIA

En ocasiones es necesario el uso de un transformador de voltaje para poder llevar la potencia eléctrica generada por el sistema híbrido hasta los usuarios, y disminuir así las pérdidas por el flujo de grandes corrientes. En esos casos se debe tener en cuenta el fenómeno de *ferroresonancia*.

La ferroresonancia es un tipo especial de resonancia eléctrica que puede ocurrir cuando una reactancia inductiva no lineal es conectada en serie o paralelo a una reactancia capacitiva. La reactancia inductiva es usualmente la reactancia de magnetización de un transformador conectado en estrella aterrizada. La reactancia capacitiva es generalmente la capacitancia de los conductores y cualquier derivación de capacitores usados en el sistema EFD. [IEEE, 1991]

La probabilidad de ferroresonancia es impredecible, ya que depende de factores tales como el largo de los conductores, la magnitud de la capacitancia del sistema, la conexión y características de saturación del transformador, la magnitud de la carga conectada, etc.

La ferroresonancia pueda ser acompañada por un voltaje anormal, alto o bajo, entre las terminales del transformador y tierra. Una sobretensión debida a la ferroresonancia se manifestará por un sonido del transformador anormal o por evarie del equipo.

#### 10.3.1. Ferroresonancia serie

Una forma de ferroresonancia está asociada con la conmutación y puede ocurrir como resultado de la apertura de una de las fases de la fuente de suministro del transforma-

Por. Para esta condición, la capacitancia de la fase abierta es energizada a través de la reactancia de magnetización del transformador. En este caso, las reactancias inductiva y capacitiva están en serie, por lo que este tipo de ferrorresonancia se conoce como ferrorresonancia en serie. [IEEE, 1991]

En la resonancia serie la impedancia está dada por la siguiente expresión:

$$Z = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})$$

Es evidente que hay una frecuencia a la que estas reactancias serán iguales y opuestas, haciendo la reactancia del circuito igual a cero. Esta frecuencia es la frecuencia de resonancia y está dada por la siguiente expresión:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Cuando entra en resonancia el circuito, el voltaje entre las terminales de L como en las terminales de C, puede ser muchas veces mayor que el voltaje total en terminales. Dichos voltajes pueden ser peligrosos. El factor de calidad Q es el que incrementa el voltaje y se define para la resonancia en serie como:

$$Q_0 = \frac{\omega_0 L}{R_0}$$

El voltaje en la inductancia es  $j\omega L$ . En resonancia se convierte en  $j\omega_0 L$ . Sustituyendo  $\omega_0 L = Q_0 R_0$ , el voltaje en terminales de la inductancia en resonancia será:

$$j\omega_0 L = jQ_0 R_0 I = jQ_0 V$$

Esto significa que el voltaje en la inductancia será, en resonancia, Q veces mayor que el voltaje terminal aplicado y con un ángulo en adelante de  $90^\circ$ , por lo que el voltaje en terminales de la capacitancia en resonancia será igual a  $-jQ_0 V$ .

Este tipo de resonancia puede ser debida a la operación de dispositivos monopolaras, tales como interruptores o fusibles. La manera de anular la ferrorresonancia es abrir o cerrar todas las fases. [IEEE, 1991]

### 10.3.2. Ferrorresonancia en paralelo

Un segundo tipo de ferrorresonancia pueda ocurrir durante condiciones de operación normal. Donde el transformador, el generador y el banco de capacitores están en paralelo. Si el transformador se satura, habrá un intercambio de energía entre la capacitancia del sistema y la alta reactancia de magnetización no lineal del transformador.

El rápido cambio en el flujo del transformador durante este período puede producir altas sobrecorrientes.

La resonancia en paralelo presenta una gran similitud con la resonancia en serie, sin embargo su conducta es diferente. La impedancia es cambiada por admitancia, los voltajes son reemplazados por corrientes, etc., por lo que la expresión para la admitancia del circuito es:

$$Y = G + j\omega C + \frac{1}{j\omega L} = G + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})$$

De manera similar, habrá algún valor de  $\omega$ , si se que estas susceptancias serán opuestas e iguales, teniendo como resultado una susceptancia total del circuito igual a cero. Por definición, la frecuencia de resonancia es:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Debe notarse que  $Q$  para la resonancia en paralelo del circuito  $Q_0 = \omega_0 C/G_0$  y considerando que  $\omega_0 L = 1/\omega_0 C$  y  $G_0 = 1/R_0$ , tenemos que:

$$Q_0 = \frac{\omega_0 C}{G_0} = \frac{R_0}{\omega_0 L}$$

La ferrorresonancia en paralelo pueda ser controlada por el diseño del sistema y por el uso de relés de alta velocidad. (IEEE, 1991)

## **CAPITULO 11**

# **SEGURIDAD**

---

### **11. SEGURIDAD**

El propósito de los procedimientos de seguridad eléctrica es proteger al personal durante la instalación, operación y mantenimiento de las instalaciones eléctricas y equipos asociados. A continuación se hacen algunas recomendaciones generales.

#### **11.1. Recomendaciones generales de seguridad**

Se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- En cualquier operación debe haber siempre al menos dos personas, siendo una de ellas la responsable de la maniobra.
- Todo los interruptores, desconectores y fusibles, deben ser accesibles a las personas que los operan y deben colocarse y marcarse de modo que puede identificarse fácilmente el equipo que controlan.
- De ser posible se debe verificar la operación efectuada por un interruptor o desconector, ya sea directamente o por el uso de indicadores de posición de abierto o cerrado, con imposibilidad de error al indicar la posición del dispositivo.
- Los fusibles e interruptores automáticos deben localizarse o resguardarse de tal forma que su operación no ocasione quemaduras u otros daños a personas, debido a los arcos que se formen.

- Las palancas de interruptores automáticos y partes que puedan moverse repentinamente, deben colocarse o resguardarse de manera que no puedan dañar a las personas en su proximidad.
- Los conductores de puesta a tierra no deben contar con fusibles u otro medio de desconexión.
- Si un módulo fotovoltaico necesita mantenimiento, el trabajo debe hacerse de noche o bien se desconecta el conductor principal del conjunto fotovoltaico.
- Cuando se encuentra personal trabajando en la barquilla del aerogenerador, debe estar bloqueado el rotor y el generador accionado del sistema.
- La mayor falla que se puede presentar en el aerogenerador es la caída de la torre o el desprendimiento de una de las aspas. En el caso de derrumbe, éste podrá ser en cualquier dirección, por lo que se deberá establecer un área de seguridad con un radio de por lo menos la altura de la torre. Para el caso del desprendimiento total de un aspa, deberán instalarse sistemas de protección que detengan el giro del rotor para que no sobrepase la velocidad para la cual fue diseñada, o cuando se presenta vibración excesiva.
- Todo motor diésel requiere un mantenimiento periódico, por ejemplo, cambio de aceite, descarbonización, afinación y reconstrucción del motor, por lo que el generador eléctrico debe estar sacionado del sistema cuando éste se realice.
- Se debe tener iluminación de seguridad en la sala de máquinas en caso de falla.
- Para trabajar en el cuarto de baterías se recomienda usar guantes, gafas y zapatos con suela de caucho. Se debe evitar el contacto directo del electrolito en la piel y ropa. Cuando las baterías están conectadas en serie puede haber peligro de electrocución.
- Cuando se trabaje con baterías se debe utilizar herramienta aislada, aun en configuraciones de baja tensión, ya que pueden causar quemaduras al se hace cortocircuito accidental en sus terminales.

- No deben instalarse equipos de calefacción de flama o de resistencias incandescentes expuestas a los gases de las baterías.
- Es conveniente quitarse cualquier objeto metálico como relojes, anillos u otros que se lleven antes de probar los circuitos eléctricos.
- Deben instalarse anuncios preventivos y debe estar el área restringida a personal autorizado tanto en el aerogenerador, en el conjunto fotovoltaico y la planta electrógena como en el recinto del banco de baterías. En éste último además debe estar provisto de carteles de aviso que prohíban el acceso con fuego o fumar dentro del mismo.
- Las conexiones bien hechas y seguras, así como la instalación adecuada de interruptores, fusibles, pararrayos y apartarrayos es muy importante para el funcionamiento y mantenimiento seguro del sistema.
- Se recomienda un mantenimiento preventivo periódico del sistema. De esta manera se pueden descubrir y corregir problemas antes de que afecten la operación del sistema EFD.

También se debe tener en cuenta que la instalación del sistema híbrido debe ser apropiada para disminuir el riesgo de accidentes, por lo que se deben considerar las siguientes indicaciones respecto a dicha instalación:

- Las conexiones bien hechas y seguras son esenciales si se desea que el sistema tenga una vida útil larga. La causa principal de problemas en el sistema son el descuido de dichas conexiones. La instalación de interruptores, fusibles, pararrayos y apartarrayos adecuado es muy importante para el funcionamiento y mantenimiento seguro del sistema.
- El tipo de conductores así como el calibre deben estar de acuerdo con las normas eléctricas nacionales o internacionales correspondientes, por ejemplo, el código NEC en el artículo 300 sobre conductores.

● Para buenas conexiones utilice conectores. Las conexiones entre los subsistemas se pueden realizar en tires terminales instaladas en una caja resistente a la intemperie.

● No es recomendable hacer dos o tres conexiones en una misma terminal.

● Realizar un mantenimiento preventivo periódico del sistema. De este manera se pueden descubrir y corregir problemas antes de que lleguen a afectar el funcionamiento del sistema. Se recomienda inspeccionar los siguientes elementos:

- Revisar que las conexiones sean firmes. Las conexiones de las baterías deben estar limpias.
- Verificar el nivel de electrolito y la gravedad específicos del banco de baterías. No exceder el nivel máximo de electrolito.
- Inspeccionar visualmente el alambreado del sistema.
- Verificar la tensión de las celdas. Si la tensión varía en más de 10% del valor medio, es posible que haya un problema.
- Inspeccionar la estructura de montaje del conjunto fotovoltaico y el mecanismo de seguimiento.
- Verificar el funcionamiento de interruptores.
- Inspeccionar las aspas del aerogenerador, así como la lubricación del mismo.

## 11.2. Conexión a tierra

El objetivo de la conexión a tierra es proporcionar un camino definido de baja impedancia desde los puntos seleccionados del sistema a tierra. Dicha trayectoria debe conducir la corriente de falla si ocurre una avería en el sistema.

Esta conexión sirve también para descargar corrientes transitorias inducidas por rayos. Una conexión de baja resistencia requiere un buen contacto entre el electrodo y el suelo mismo. El contacto con el agua subterránea ayuda a reducir la resistencia del terreno. Si el sistema estuviera sobre un suelo rocoso, se recomienda disminuir la resistencia del suelo añadiéndole sustancias.

La conexión a tierra de los equipos se hace principalmente por razones de seguridad. Todas las superficies metálicas, el armazón del conjunto fotovoltaico, la torre del aerogenerador, la carcasa del generador diésel, etc. que puedan ser tocadas por el personal, deben ser conectadas a tierra. Esta conexión reduce el riesgo de electrocución si ocurriera una falla a tierra. Se deben seguir las recomendaciones por normas nacionales o internacionales, por ejemplo, el artículo 250 del código NEC sobre aterrizamiento de equipos.

---

## CONCLUSIONES

---

### CONCLUSIONES

Los sistemas EFD son económicamente los más viables para electrificación rural, cuando se trata de lugares muy alejados de las redes convencionales de suministro eléctrico. Por otro lado, el uso de recursos naturales para la producción de electricidad es una necesidad creciente en nuestros días debido a que las fuentes renovables permiten disminuir el consumo de hidrocarburos y de otro tipo de combustibles. Por tales motivos, el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía están siendo tomadas como un medio alternativo para la generación eléctrica a nivel mundial.

Muchas comunidades en el país que aún no cuentan con el servicio eléctrico podrían beneficiarse con éstos sistemas. Otras que utilizan generadoras diesel-eléctricas podrían mejorar la calidad del servicio, así como abatir costos de operación y mantenimiento, al reconfigurar sus instalaciones para incluir la generación solar y eólica. El requisito fundamental es realizar una apropiada selección del sitio donde se instale el sistema EFD y efectuar los cálculos y consideraciones técnicas necesarias para sus diferentes equipos y protecciones.

Como se vió, el principio básico de operación del sistema EFD es utilizar las energías solar y eólica para producir electricidad, la cual será almacenada en un banco de baterías para posteriormente acondicionarla para su consumo.

Cuando ocurre una falla eléctrica, debe procurarse que los elementos de protección aislen la falla únicamente en el ramal afectado, estando debidamente coordinados con las protecciones de respaldo. En caso de ser necesario, el sistema automático de control podrá desconectar cualquier sistema o equipo para evitar su contribución a la corriente de falla.

## CONCLUSIONES

Debido a la intermitencia y variación de voltaje de los sistemas eólico-solares, deberá utilizarse un banco de baterías como almacén de energía para poder suministrar a la carga una potencia continua.

El sistema acondicionador de potencia, constituido por el inversor y el controlador de carga, debe proporcionar la energía, frecuencia eléctrica y forma de onda de voltaje que sean demandadas por la carga.

Si es el caso de la arquitectura del sistema, la máquina diesel-eléctrica debe seleccionarse y operarse de manera tal, que suministre eficientemente la energía necesaria en las horas pico de demanda de carga.

También deberá ponerse especial atención cuando esta máquina se destine a los diferentes procesos de carga del banco de baterías, a través del SAC o en forma autónoma. (flotación, igualación, etc.).

La confiabilidad y disponibilidad del sistema depende en gran medida del dimensionamiento del banco de baterías, ya que éste define el grado de autonomía del sistema en lapsos donde haya poca o nula aportación de las fuentes de energía renovable.

El presente trabajo comenta la factibilidad de utilizar un inversor bidireccional para emplearlo como un cargador de baterías. Esto es importante debido a que en otras configuraciones el generador diesel-eléctrico funciona solamente como respaldo para alimentar a la carga conectada en caso de falla del inversor, o funciona en forma constante suministrando continuamente energía al banco de baterías. La incorporación de este tipo de inversor propicia la recarga de las baterías con las fuentes renovables o con el generador diesel-eléctrico, mientras alimenta a la carga conectada. Con esto se aumenta la confiabilidad del sistema.

Uno de los principales problemas del grupo EFD radica en la coordinación de los diferentes sistemas generadores, así como la regulación de los ciclos de carga-descarga del banco de baterías.

Las configuraciones para la operación de un sistema híbrido pueden ser tan sencillas o complejas como se requiera, en función de la magnitud y tipo de carga conectada.

## CONCLUSIONES

---

Cuando ocurra impacto directo de rayo o sobrestensiones inducidas debido a descargas eléctricas atmosféricas, los dispositivos de protección deberán operar en forma eficaz evitando daños a las diferentes componentes del sistema EFD.

La distribución de la energía eléctrica generada en un sistema EFD se hace bajo una filosofía similar a la de las redes convencionales de distribución eléctrica, claro está, bajo los requerimientos propios de un sistema de pequeña potencia.

Debido a la diferente naturaleza de las fuentes generadoras de energía en este tipo de sistemas, así como a los elementos de acondicionamiento de potencia y de protección eléctrica, es claro que el grado de dificultad para el diseño, selección y correcta operación del sistema es mayor que en un sistema de similar potencia, alimentado con fuentes convencionales. A esto debe sumarse lo impredecible del comportamiento de los vientos y las variaciones de los niveles de insolación, lo que incrementa aún más la dificultad en el diseño.

Por tal razón, este tipo de sistemas se encuentran aún en etapa de estudio, por lo que sólo los especialistas en fuentes renovables deberán ser los responsables de su diseño e instalación. Aún así y por lo comentado, existirán riesgos de operación del sistema que deberán ser manifestados al usuario.

---

## BIBLIOGRAFIA

---

- BOSCH SOLSONA JOSE. Interconexión de periféricos a microprocesadores, Marcombo, México, 1984, 229pp.
- CHAPMAN STEPHEN J. Máquina eléctricas, Mc Graw Hill, México, 1988, 655pp.
- COLLAZO JAVIER L. Diccionario enciclopédico de términos técnicos. Inglés-español, español-inglés, Mc Graw Hill, EUA, 1980, Vol. 1 y 2, 1787pp.
- CORRALES MARTIN JUAN. Introducción a los fenómenos transitorios, Marcombo, España, 1983, 377pp.
- DORF RICHARD C. The electrical engineering handbook, CRC PRESS-IEEE PRESS, USA, 1993, 2660pp.
- ENRIQUEZ HARPER GILBERTO. Elementos de centrales eléctricas I, Limusa, México, 1982
- ESPINOSA Y LARA ROBERTO. Sistemas de distribución, Limusa, México, 1990
- FINK DONALD G., CHISTRIANSEN DONALD. Electronics engineers' handbook, Mc Graw Hill, USA, 1989
- FULLEA GARCÍA JOSE. Acumuladores electroquímicos, Mc Graw Hill, España, 1994, 248pp.
- GARZA M. ANIBAL. "Efectos de las descargas eléctricas atmosféricas sobre aerogeneradores de eje horizontal", Boletín IIE, 1994, Vol. 18, No. 5, pag. 199-203

## BIBLIOGRAFIA

---

- GARZA M. ANIBAL. Aerogeneradores de eje horizontal, IIE, México, 1994 (IIE-NAG-2)
- GUALDA G. JUAN A.; MARTINEZ GARCIA, SALVADOR. "Convertidores cc/cc y cc/ca", Electrónica y automática industriales, Marcombo, España, 1979, pag. 115-137
- GÜNTER G. SEIP. Instalaciones eléctricas, Siemens, Tomo 2, Alemania, 1989
- HUACUZ V. JORGE. "Sol, viento y generación eléctrica", Boletín IIE, 1995, Vol.19, No.5, pag. 183-193
- HUACUZ V. JORGE, MARTINEZ ANA M. "Rural electrification with FV systems in Mexico: Current status and opportunities for research", 20TH IERE General Meeting, Japan, April 10 to April 15, 1994
- HUBERT CHARLES I. Circuitos eléctricos CA/CC, Mc Graw Hill, 1985
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Practice for the electrical design and operation of windfarm generating stations, USA, 1991 (IEEE Std. 1094-1991)
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Low voltage surge-protective devices, USA, 1992 (ANSI/IEEE C62.42-1992)
- KEIL HEINRICH. Microcomputadores, Siemens-Marcombo, España, 1988, 432pp.
- LE GOUREURS D. Energía eólica, Messon, España, 1983
- MEYER F., GERHARD A. Automotive electric/electronic systems, BOSCH-SAE, Alemania, 1988, 347pp.

- NATIONAL FIRE PROTECTION. National Electric Code-NEC, USA: NFPA, 1993, 917pp. (NFPA 70-1993)
- NAYAR C.V. et al. "Novel wind/diesel/battery hybrid energy system", Solar Energy (USA), 1993, Vol.51, No. 1, pag. 65-78
- ORGANIZACION LATINOAMERICANA DE ENERGIA. Manual de integración de aerogeneradores de mediana capacidad a primarios de distribución, OLADE, Ecuador, 1984 (serie: Documentos D-PLACE No. 17)
- PLATZ WOLFGANG. Electricidad solar: estudio económico de la energía solar, BLUME-UNESCO, 1979
- PROTOGEROPOULOS C. et al. "Battery state of voltage modelling and algorithm describing dynamic conditions for long-term storage simulation in a renewable system", Solar Energy, 1994, Vol.53, No.6, pag. 517-527
- SANDIA NATIONAL LABORATORIES. Manual de prácticas recomendadas para proyectos de sistemas fotovoltaicos independientes, Photovoltaic Design Assistance Center, USA, 1990 (SAND 90-7029)
- SANDIA NATIONAL LABORATORIES. Handbook of secondary storage batteries and charge regulators in photovoltaic systems, Exida Management and Technology Co., USA, 1979 (Final report SAND-81-7135)
- SECOFI-DIRECCION GENERAL DE NORMAS. Normas técnicas para instalaciones eléctricas. Parte 1: Instalaciones para el uso de energía eléctrica, IPN, México, 1990, 296pp.
- SKILLING HUGH HILDRETH. Circuitos en ingeniería eléctrica, CECSA, México, 1981, 846pp.

## BIBLIOGRAFIA

---

- **TANAKA SUSUMU.** An investigation on the hybrid-type photovoltaic, wind-power generating system. Japan, 1987, 15 pp. (IERE R-8631)
- **VIQUEIRA L. JACINTO.** Redes eléctricas. Representaciones y servicios de ingeniería, México, 1986, Vol.2, 452pp.
- **WEISSMAN JANE M., HARLAND A. BRUCE.** Photovoltaic resources: applications, utilization and assessment. Guidebook for policy planners. UNITAR and Massachusetts PHOTOVOLTAIC CENTER, USA 1990, 256pp.
- **ZWEIBEL KENNETH.** Basic photovoltaic principles and methods. VNR COMPANY, USA, 1984, 249pp.