

CAPÍTULO 2
PROTECCIONES DE
AEROGENERADORES

2.1.- Energías Renovables.

2.1.1.- Introducción.

Las energías renovables están recibiendo un gran impulso, debido a una mayor conciencia medio-ambiental, a la necesidad de reducir la dependencia de los países productores de petróleo y como alternativa para el abastecimiento eléctrico de países en vías de desarrollo.

Los tipos de energía que son consideradas energías renovables son aquellas que se encuentran en fuentes naturales virtualmente inagotables, por la inmensa cantidad de estas o porque se regeneran en forma natural. Con este tipo de energía se puede disminuir la dependencia de los combustibles fósiles así combatiendo el calentamiento global, la polución en las ciudades y entregando una mejor calidad de vida a los habitantes. Las principales fuentes de este tipo de energía son:

Energía Hidráulica: Consiste en el uso del caudal de ríos para la generación de energía eléctrica y mecánica, por medio de instalaciones que aprovechan el flujo del agua. Energía producida 24 horas al día mediante plantas nano, micro y mini hidroeléctricas, pueden generar electricidad para una amplia gama de aplicaciones, como iluminación, recreación, educación y micro-industrias.

La generación hidráulica es afectada cuando hay periodos de sequía y la capacidad de generación es mermada por la falta de agua, cuya fuerza de caudal es la base de este tipo de generación

Energía Solar: Es la captura de la energía del sol, para proveer energía en forma de electricidad a través de paneles fotovoltaicos, y calor a través de colectores y cocinas solares. Se utiliza para sistemas fotovoltaicos residenciales, bombas de irrigación, linternas solares, iluminación comunitaria, estaciones de carga de baterías, secadora de frutas y maderas.

Considerada una de las fuentes de energía de mayor continuidad pues las grandes centrales de energía solar son ubicadas en climas cálidos debido al mayor grado de radiación

solar en la zona, en cuanto a los pequeños sistemas fotovoltaicos son afectados por el mal clima y la estación del año que modifica las horas de luz solar.

Energía Eólica: Se basa en el aprovechamiento de la fuerza del viento para producir energía eléctrica a través de la energía mecánica. Dependiendo de la velocidad del viento para la producción de energía eléctrica, a pequeña y mediana escala puede ser aplicada a varias comunidades rurales las que comúnmente tienen entre 100 y 1.500 viviendas, localizadas en un radio de entre 10 y 40 kilómetros de la planta generadora.

Modifica el paisaje además de ser perjudicial para la fauna, en algunos lugares el viento simplemente no existe o en otros la variación de la generación del viento es constante no permitiendo una generación continua a través de la energía eólica

Energía Biomasa: Consiste en el procesamiento de materia orgánica, tal como madera, residuos de cultivación y excrementos de animales, para la generación de energía a partir de combustión. La biomasa puede ser quemada directamente para producir calor o vapor, o fermentada para producir biogás. En ambos casos, el producto puede ser utilizado para generar calor y vapor para procesos (cocción de alimentos, secado de granos) o para generar electricidad también por medio de la gasificación.

Energía Geotérmica: Calor extraído de estratos geológicos bajo la superficie de la tierra, generalmente cerca de zonas volcánicas. Puede ser utilizado para calor de proceso o para generar electricidad mediante la evaporación de líquidos.

2.1.2.- Energía Eólica

“EOLO, según la mitología griega, era el dios de los vientos. Hijo de Zeus y la ninfa Menalipa, con sólo inflar sus enormes cachetes podía producir huracanes, sirocos, ventiscas, tempestades e incluso brisas, según su variable estado de ánimo.”

La energía eólica ha sido aprovechada por el hombre durante siglos tanto en la navegación, movilizándose por el mar, como en la agricultura, en la extracción de agua o la molienda de cereales.

Se puede decir que la energía eólica es un subproducto de la energía solar pues la radiación solar es la responsable de la creación del viento en la tierra, el viento se produce por el movimiento de las masas de aire en la troposfera, la capa más baja de la atmósfera, dentro de ella, los vientos que tendrán interés desde el punto de vista energético son los que se producen a nivel de la superficie terrestre.

Hoy en día los sistemas eólicos están en realce de la mano de grandes compañías, en el mundo el uso de la energía eólica está en aumento constante como lo presenta la siguiente tabla.

Tabla 2.1. Nivel mundial de generación de energía eólica [22].

Nivel Mundial de Energía Eólica				
Posición	País	Capacidad Total junio del 2010 MW	Capacidad Añadida junio del 2010 MW	Capacidad Total final del 2009 MW
1	Estados Unidos	36.359	1.200	35.159
2	China	33.810	7.800	26.010
3	Alemania	26.437	660	25.777
4	España	19.549	400	19.149
5	India	12.125	1.200	10.925
6	Italia	5.300	450	4.850
7	Francia	5.021	500	4.521
8	Reino Unido	4.592	500	4.092
9	Portugal	3.765	230	3.535
10	Dinamarca	3.687	190	3.497
	Resto del Mundo	24.568	2.870	21.698
Total		175.213	16.000	159.213

En latinoamérica también se está utilizando este tipo de generación de energía teniendo una importante alza en la última década

Tabla 2.2. Generación eólica en latinoamérica [22].

Generación Eólica en Latinoamérica			
	País	Generación Total MW	Porcentaje Generación Respecto a la Generación Total
1	Brasil	415	0,4%
2	México	85	0,17%
3	Costa Rica	70	2,8%
4	Nicaragua	40	5%
5	Argentina	29	0,1%
6	Uruguay	20	0,8%
7	Chile	20	0,2%
8	Colombia	20	0,1%
9	Cuba	7.2	0,05%
10	Ecuador	2.4	0,05%
11	Perú	0	0%
12	Venezuela	0	0%
Total		699	9,67%

2.1.3.- Sistemas Aislados.

La necesidad de electricidad de las personas que viven en lugares aislados del sistema eléctrico tanto por distancia como por geografía, lleva a la implementación de sistemas aislados de energía.

La alimentación de energía es suplida mayoritariamente por sistemas a base de energía fósil como son los grupos diesel. Esta tecnología es bastante conocida y con una buena mantención el sistema es muy robusto además cuenta con una gran disponibilidad de energía producida, pero en sistemas aislados, el costo de mantención más el del combustible y el propio traslado del combustible son factores importantes a considerar en la evaluación de este tipo de proyecto.

La utilización de derivados del petróleo en la generación de energía, mediante su combustión, provoca emisión de gases los cuales son nocivos para las personas y el ambiente los principales gases son:

- Dióxido de carbono CO_2
- Óxido de azufre SO_x
- Óxido de Nitrógeno NO_x

En concreto, la concentración del más importante de estos gases, el CO_2 , ha aumentado un 30% desde 1750, donde el consumo de petróleo es el responsable del 50% de estas emisiones en la UE. A nivel mundial la combustión del diesel es responsable de la emisión a la atmósfera de pequeñas partículas que contribuyen apreciablemente a la contaminación en forma de “smog”, y que además están relacionadas con enfermedades como el cáncer pulmonar.

La producción de energía con sistemas a base de energía renovable hoy en día no es substituta a las energías tradicionales pero con el avance tecnológico y el aprovechamiento energético más disponibilidad de la energía producida además con la reducción de costo de este tipo de sistema se puede pensar en un futuro con un ambiente más limpio y debido a la producción en gran escala de energía a base de sistemas de energía renovables.

Para un sistema aislado la tecnología de energías renovables se puede ajustar perfectamente a las necesidades energéticas de una comunidad o localidad aislada, considerando que las energías renovables han sido utilizadas durante mucho tiempo en sectores rurales tanto para la calefacción con sistemas solares o el riego agrícola con el sistema de bombeo de agua con un molino de viento o los baños termales que son energía geotérmica. En la generación de electricidad los más utilizados y de mayor proyección son la energía solar, la energía eólica, los aprovechamientos mini hidráulicos, la biomasa y la energía geotérmica

Tabla 2.3. Fuentes de electricidad en sistemas aislados, tecnologías convencionales [1]

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Sistema fotovoltaico Individual	-Dimensiones a necesidades de los usuarios	-Poca potencia -Necesita almacenamiento
Sistema fotovoltaico para mini red eléctrica	-Corriente alterna -Uso de equipos de mayor Potencia	-Abuso de algunos usuarios -Necesita almacenamiento
Sistema eólico individual	-Uso de equipos de mayor Potencia -Puede generar corriente alterna	-Operación intermitente -Necesita almacenamiento
Sistema eólico para mini red eléctrica	-Corriente alterna -Usos comunales y productivos como riego o bombeo	-Operación intermitente -Necesita almacenamiento o respaldo
Micro central menor 1 kW individual	-Permite actividades productivas (turismo, sistemas agropecuarios)	-Puede necesitar almacenamiento con baterías o agua -Puede operar intermitentemente
Micro central mayor 1 kW individual	-Permite actividades Productivas	-Puede necesitar almacenamiento de agua -Puede operar intermitente
Micro central para mini red eléctrica	-Permite actividades Productivas	-Puede necesitar almacenamiento de agua -Puede operar intermitente

Tabla 2.4. Fuentes de electricidad en sistemas aislados, tecnologías no convencionales [1]

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Biogás	-Fuente de energía Permite usar existentes de gasolina y diesel	-Almacenamiento de gas -Instalar en lugares de rellenos sanitarios, lecherías, granjas porcinas, café, etc.
Gasificación de biomasa	-Fuente de energía -Permite actividades Productivas	-Alta capacitación en operación y
Sistemas híbridos	-Combinación óptima en de combustibles -Garantía de servicio Constante	-Necesita almacenamiento en baterías

2.1.4.- Sistemas Eólicos Aislados.

La necesidad de electricidad de las personas que viven en lugares aislados del sistema eléctrico ya sea por distancia o geografía, lleva a la implementación de sistemas aislados de energía. Los que mayoritariamente son sistemas diesel pero por motivos ecológicos y económicos se pretende utilizar las energías renovables ya sea en sistemas híbridos o puros.

La configuración más simple de un sistema eólico es la de un aerogenerador que alimenta una carga sin ningún tipo de almacenamiento energético. Al considerar la variabilidad del recurso eólico teniendo en cuenta que no en muchos terrenos se muestra una estabilidad en cuanto a la velocidad y disponibilidad de este recurso, se requiere un tipo de almacenamiento energético para así almacenar el excedente de energía producida en los horarios punta.

Lo habitual son los sistemas híbridos que combinan la generación eólica con la fotovoltaica más un banco de baterías, para alimentar cargas tanto en CC como AC. El sistema diesel-eólico puede llegar a ser de la forma en que al aumentar el viento y siendo un

Protecciones para Pequeño Generador Eólico

aerogenerador grande puede llegar a desconectar el generador diesel, haciendo más eficiente el consumo de diesel optimizando los recursos. En la actualidad existen aerogeneradores con la capacidad de controlar la potencia así entregar una cantidad de potencia pareja no dependiendo de las fluctuaciones de la velocidad del viento, pero esta tecnología sufre de un precio más elevado y en un sistema aislado no es de gran provecho siendo más eficiente una tecnología robusta y sencilla, algunos ejemplos de las configuraciones de sistemas aislados son las siguientes:

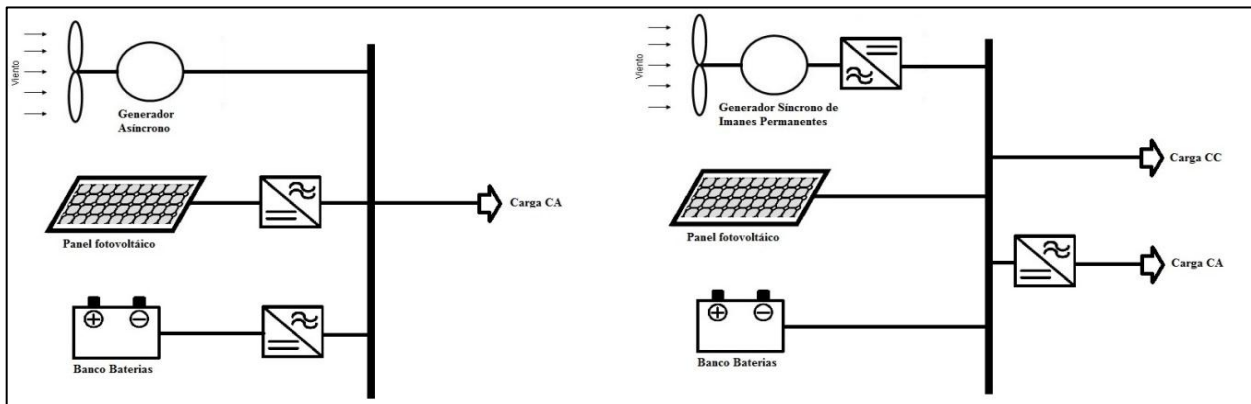


Figura 2.1. Configuraciones sistema eólico-solar [4]

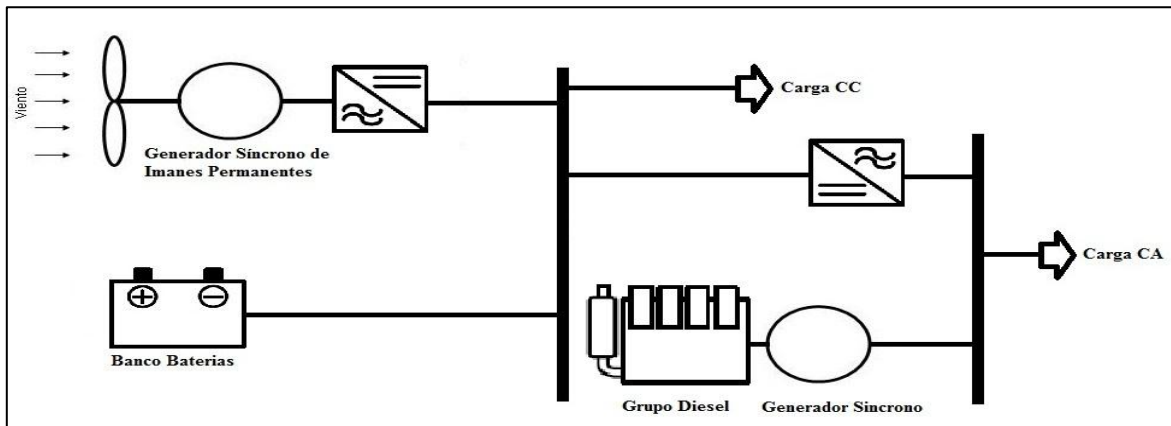


Figura 2.2. Configuración sistema eólico-diesel [4]

Al pensar en un sistema de generación para una zona aislada se debe considerar la cantidad de materia prima para la producción de energía como las cargas que se alimentarán con el sistema de tal manera que se opte por la solución más económica y robusta posible.

2.1.5.- Sistemas de Almacenamiento de Energía.

El almacenamiento de energía es el método que permite gestionar los desequilibrios entre la producción y el consumo de energía eléctrica para garantizar la calidad de suministro. En los sistemas aislados se produce un superávit pues no se puede controlar la radiación solar ni la variación del viento y el superávit de energía debe ser almacenado para utilizarse en los periodos de déficit de la generación energética del sistema.

El consumo energético es representado mediante la curva de demanda la cual presenta las variaciones entre las horas pico y valle, esta curva se caracteriza en su forma diaria y estacionaria, la demanda diaria tiene su aumento durante el día y en la noche decae mientras la estacional decae en el verano y aumenta en invierno. El sistema de generación debe ajustarse a las características de su curva de demanda lo que conlleva problemas como; sobredimensionamiento del sistema, pérdidas, bajo rendimiento, excesivos ciclos partida/parada.

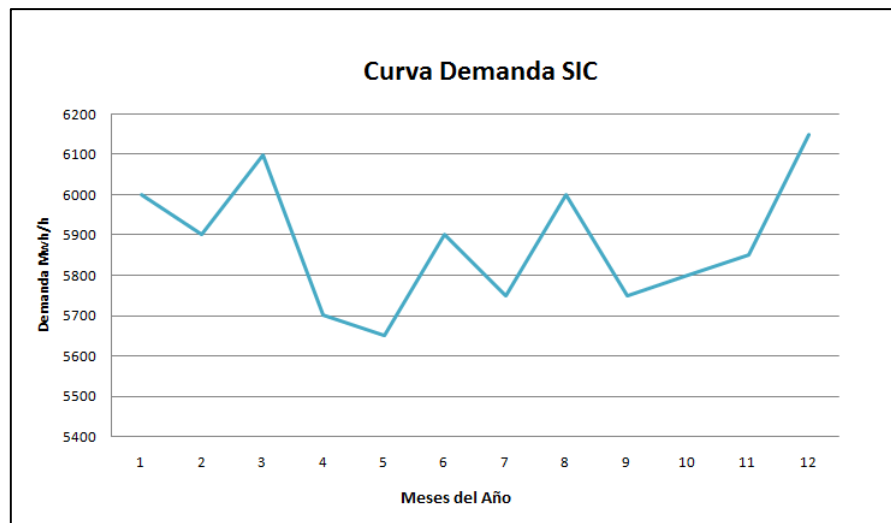


Figura 2.3. Ejemplo curva demanda. [23]

La generación con energías renovables aumenta los problemas mencionados antes porque se encuentran sujetas a variaciones ya sean de carácter estacionario como es en la solar pues en verano suben los niveles de radiación solar y en invierno decaen, la energía eólica los vientos son mayoritariamente débiles en verano no así en invierno, la tendencia diaria, el día y la noche afecta la energía solar y en la eólica los vientos suelen ser más fuertes de día que de noche.

Los métodos más comunes de almacenamiento de energía en sistemas aislados son: banco de baterías y volantes de inercia.

-Banco de baterías:

Es la forma común de almacenamiento de energía utilizada en corto y mediano plazo, en algunos casos también a largo plazo, almacenan energía en forma electroquímica, el rendimiento común es de un 70% a 80% actualmente se encuentran algunas de mayor rendimiento pero con un precio elevado.

Las desventajas más importantes son su necesidad de mantenimiento, su elevado peso, largos períodos de carga, dependencia de la eficiencia con la temperatura, además de la gran cantidad de espacio que ocupan.

Su mayor ventaja es la ausencia de elementos mecánicos con el desgaste y mantenimiento que estos llevan asociados. Los parámetros que más afectan al diseño de una batería son la profundidad de descarga, la temperatura de trabajo, número de ciclos de carga y descarga, número de celdas en serie y el mantenimiento.

-Volante de Inercia:

Esta forma de almacenamiento de energía es utilizada hace siglos, almacena energía en forma cinética en una masa en rotación, tienen un considerable rendimiento en cuanto a energía eléctrica aproximadamente un 85% sobre el rendimiento de las baterías, El volante continúa su movimiento por inercia cuando cesa el par motor que lo propulsa con esto continua el funcionamiento del generador acoplado.

Sus desventajas son el gran tamaño, una mantención constante a los cojinetes que lo soportan, la necesidad de un convertidor CA/CA pues la red está en frecuencia constante y el generador es de frecuencia variable.

Sus mayores ventajas son soporta muchos ciclos carga-descarga, profundidad de carga, rapidez de respuesta, mantenimiento reducido, fácil control de potencia y una gran cantidad de energía por unidad de volumen.

2.2.- Protección del Generador.

2.2.1.- Introducción.

Las máquinas rotatorias tienen la transición entre el funcionamiento como motor o generador dependiendo del deslizamiento de esta [7].

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.1)$$

Donde:

s = Deslizamiento.

n_s = Velocidad síncrona.

n_r = Velocidad del rotor.

El deslizamiento puede ser positivo o negativo, para que la máquina realice su trabajo en forma de generador el deslizamiento debe ser negativo.

En un aerogenerador se transforma energía cinética del viento en energía mecánica mediante el giro del rotor eólico. Esta energía mecánica que aparece en el eje del rotor, se transforma en energía eléctrica mediante una máquina eléctrica, operando como generador de energía eléctrica, gracias al giro del eje del rotor en el aerogenerador, provocado por la acción del viento sobre las palas. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura (denominada también estator). Si

mecánicamente se produce un movimiento relativo entre los conductores y el campo, se generará una fuerza electromotriz.

Los generadores pueden ser de distinto tipo dependiendo de su forma de construcción, su modo de operación, si genera en corriente continua o alterna. Son el equipo de mayor costo del sistema eléctrico de potencia tanto en su adquisición, como en el costo que conlleva sacarlos de servicio. Son regularmente sometidos a condiciones indeseables por ende estos deben estar resguardados ante cualquier tipo de falla que presenten. Se requiere considerar muchos casos de condiciones anormales que pueden llevar a la salida de servicio del generador o a su completa destrucción.

Las protecciones de un generador dependen de varios factores como el tipo de generador, tiempo promedio de uso, etc. Esto es coherente al ingeniero que diseñe el sistema de protecciones y también al operador del sistema de potencia. Un sistema de protecciones eficiente garantiza el funcionamiento del generador en caso de falla aislada o falla de una fuente de alimentación o de un componente del sistema de protección.

Los sistemas de protección en generadores varían con relación a las necesidades, ya sea la desconexión automática en caso de falla o un aviso de alarma para poder controlar el caso de falla sin la necesidad de desconectar el generador y evitando con ello la salida de servicio. Sin embargo, no se debe olvidar las reacciones comunes de las máquinas rotatorias como la sobrecorriente en la partida de un motor de inducción, o los casos particulares que se presentan en el uso de generadores como la sobre velocidad en generación hidráulica o presencia de potencia inversa durante las pausas de viento en generación eólica y que es necesario mantener una cierta velocidad de giro en las aspas para un correcto funcionamiento del sistema eólico. En consecuencia aparte de las protecciones comunes que se deben manejar en un sistema de protecciones eléctricas de cualquier sistema de generación también se debe considerar los casos particulares que pueden presentar el sistema de generación que se busca implementar.

2.2.2.- Tipos de Generadores

En los sistemas de generación eólica generalmente se produce energía mediante maquinas del tipo AC, generadores síncronos y asíncronos [4, 5, 6].

2.2.2.1.- Generadores Síncronos:

“Los generadores síncronos o alternadores son máquinas síncronas utilizadas para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica AC.” (Chapman, 2000) [7].

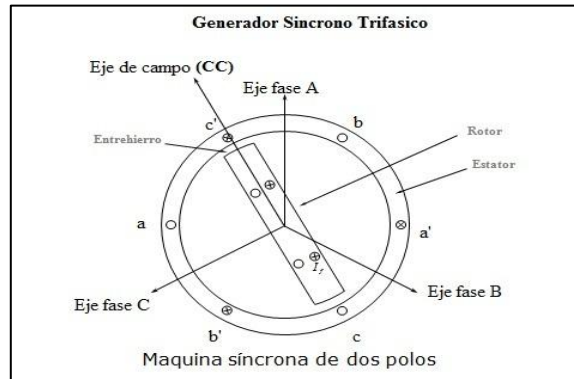


Figura 2.4. Máquina síncrona trifásica [21]

La máquina síncrona suelen ser construida con dos tipos de rotor dependiendo de la cantidad de polos que esta posea, de dos o cuatro polos es de la forma de polos no salientes en cambio los de cuatro o más polos son de la forma polos salientes.

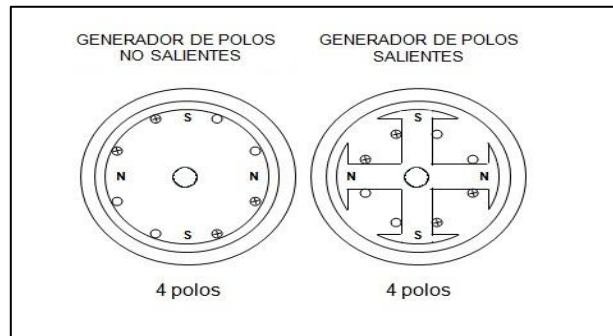


Figura 2.5. Tipo de construcción de generadores síncronos [21]

En un generador síncrono al aplicar una intensidad DC al devanado de campo se forma un campo magnético, al girar el rotor se produce un campo magnético rotatorio dentro de la máquina el cual induce una tensión en el devanado de armadura del generador. Los diferentes tipos de generadores síncronos se caracterizan por la manera en que se suministra la corriente CC al devanado de campo, las formas de suministrar la corriente CC más comunes son, mediante anillos y escobillas, los anillos se encuentran en el rotor de la maquina pero aislados del mismo. Si se conecta una fuente CC a las escobillas se aplica un voltaje CC parejo al devanado de campo, y la excitatriz en la cual se encuentra un generador AC el cual tiene su circuito de campo montado en el estator y el de armadura en el eje del rotor, la intensidad de salida es rectificada mediante diodos que están montados en el mismo rotor.

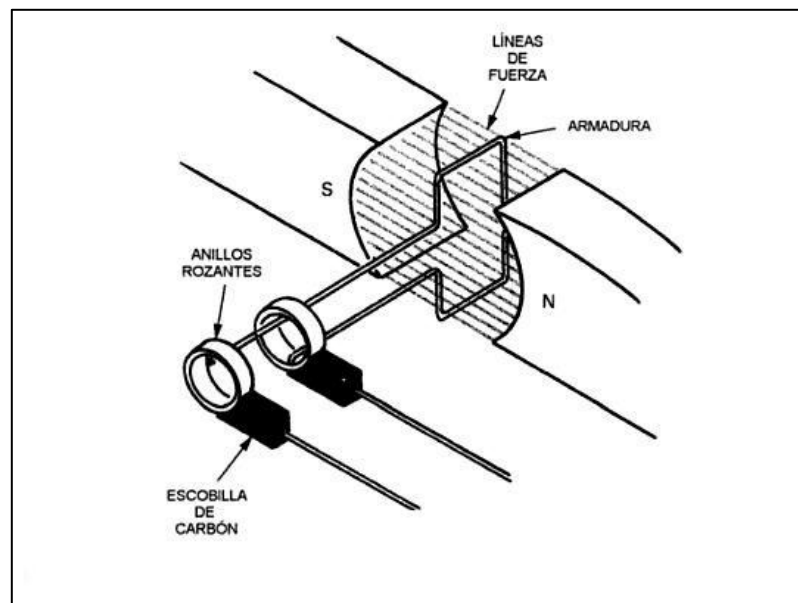


Figura 2.6. Anillos rozantes y escobillas [21]

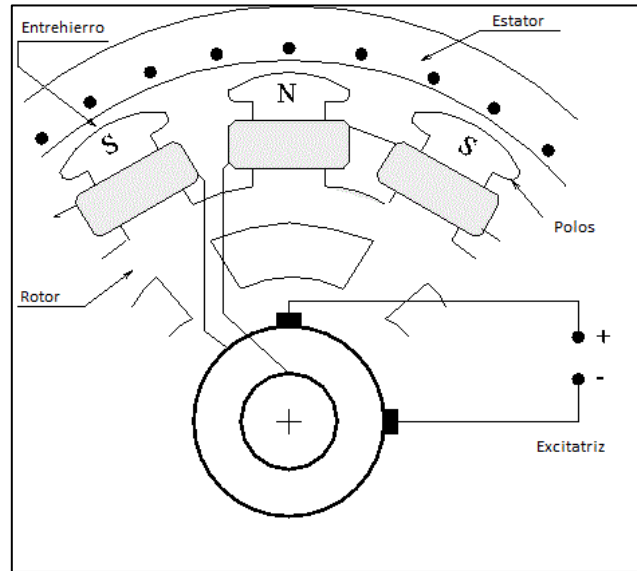


Figura 2.7. Excitatriz [21]

2.2.2.2.- Generadores Asíncronos.

“Un generador de inducción no necesita circuito de campo separado y no debe estar accionado continuamente a una velocidad fija.” (Chapman, 2000) [7].

Los generadores asíncronos o generadores de inducción son máquinas eléctricas que consumen potencia reactiva la cual es aplicada mediante bancos de condensadores con la cual se consigue mantener su campo magnético estático (compensación reactiva), estos generadores no necesitan un circuito de campo separado y no necesitan ser accionados a velocidad fija lo cual favorece su empleo en aerogeneradores. Estas máquinas necesitan de cajas multiplicadoras para adaptar la velocidad del generador a la de la turbina, lo cual aumenta considerablemente el tamaño del aerogenerador.

La construcción de esta máquina eléctrica es caracterizada por un estator con bobinas simétricas cuyo número de bobinas establece el número de polos de la máquina, el rotor se puede presentar de la forma bobinada, el cual consta de una forma de enrollado como el estator con igual número de bobinas y polos, o de jaula de ardilla el cual está formado por barras conductoras puestas en el rotor cortocircuitadas en los extremos mediante anillos conductores.

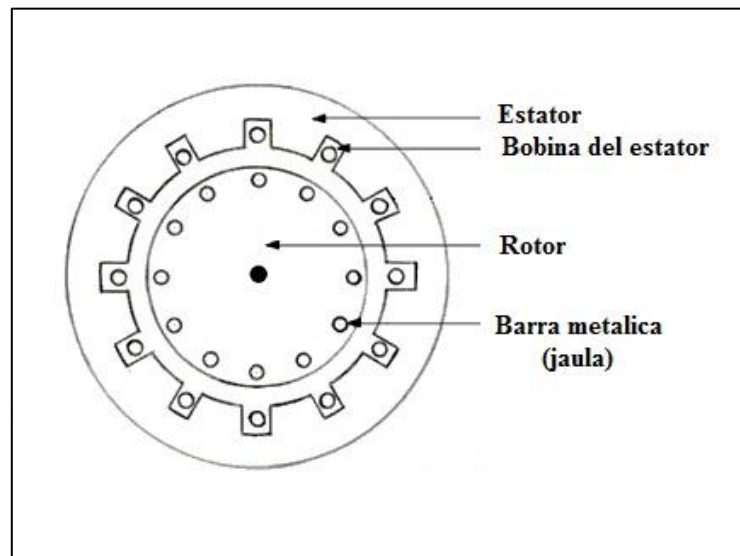


Figura 2.8. Generador asíncrono rotor jaula de ardilla [21]

En los generadores asíncronos se produce un deslizamiento, cuando la velocidad varía con la fuerza de giro aplicada, la diferencia en la velocidad de giro a potencia máxima y la velocidad de giro en vacío, es mínima alrededor del 1%, esta diferencia en porcentaje a la velocidad síncrona es el denominado deslizamiento. Si un generador gira en vacío a 1500 r.p.m. en una red de 50 Hz, si este funcionara a máxima potencia giraría a 1515 r.p.m. la variación de velocidad si la fuerza de giro varía es una propiedad mecánica que disminuye el desgaste mecánico.

La máquina asíncrona trabajando como generador presenta un deslizamiento negativo, esto implica una velocidad mayor a la síncrona y mientras la velocidad de giro sea mayor, mayor será la potencia transferida al estator en forma de fuerza electromagnética, y posteriormente convertida en electricidad suministrada a la red eléctrica.

2.2.3.- Generadores en Aerogeneradores Pequeños.

En los sistemas de generación eólica el corazón del sistema es el generador, este varía de tipo dependiendo de los requerimientos del sistema. Usualmente se utilizan generadores de

inducción por su óptima función con respecto a la velocidad del viento, pero la necesidad de una caja multiplicadora produce aerogeneradores más grandes y de mayor mantención por el desgaste mecánico de la misma.

En aerogeneradores pequeños comúnmente se utilizan los generadores síncronos de imanes permanentes por su robustez, fácil mantención además de evitar el uso de cajas multiplicadoras, que reduce considerablemente el tamaño del aerogenerador.

2.2.3.1.- Generador Síncrono de Imanes Permanentes.

Las características de construcción de un generador de imanes permanentes da a conocer un rotor en el cual están adheridos los imanes y un estator en el cual se encuentra el embobinado, entre sus principales características está el que no necesitan de una intensidad en la excitatriz para producir el campo magnético pues este es producido constantemente por los imanes permanentes con esto no se consume potencia eléctrica del sistema.

Existen dos tipos de generadores de imanes permanentes dependiendo de su eje de giro; generadores de flujo axial, en el cual el eje de giro es paralelo al campo magnético de los imanes, generadores de flujo radial, en el cual el eje de giro es perpendicular al campo magnético de los imanes.

Los imanes de estos generadores eran contruidos principalmente a base de ferrita por su bajo precio y buena desmagnetización pero con un bajo magnetismo remanente, hoy en día se utilizan materiales magnético de tierras raras; como por ejemplo samario-cobalto (SmCo5 o Sm2Co17) o el neodimio-hierro-boro (Nd-Fe-B), etc.(Rosenman,2007) [15], estos son elegidos por sus características de remanencia magnética y excelente linealidad en la curva de desmagnetización, las cuales presentan en forma muy superiores a los materiales ferromagnéticos comunes. El voltaje interno generado se rige por las características magnéticas de la máquina y la ecuación que rige el comportamiento de generación de voltaje interno es:

$$V = k * \phi_e * \omega \quad (2.2)$$

Donde:

V = Tensión interna generada

k = Constante de construcción de la máquina

$\emptyset_e$ = Flujo magnético a través del estator

ω = Velocidad angular de giro

De la ecuación se desprende que a bajas velocidades de giro para obtener la misma tensión se debe aumentar el flujo magnético de la máquina, por esto se utilizan materiales de alta inducción magnética. Las propiedades magnéticas de un material dependen de la densidad de campo magnético y la intensidad del campo magnético [17].

$$B = \mu_0 * (H + M) \quad (2.3)$$

Donde:

B = Densidad de campo magnético.

μ_0 = Permeabilidad del vacío.

H = Intensidad del campo magnético.

M = Magnetización del material.

De (2.2) también se desprende que la tensión generada depende de la velocidad de giro y esta tiene directa relación con la cantidad de polos de la misma y la frecuencia de trabajo [17].

$$f = \frac{n}{60} * \frac{p}{2} \quad (2.4)$$

Donde:

f = Frecuencia.

n = Velocidad en r.p.m.

p = Número de polos de la máquina.

El circuito equivalente de un generador síncrono de imanes permanentes es congruente con el circuito de una máquina síncrona cualquiera:

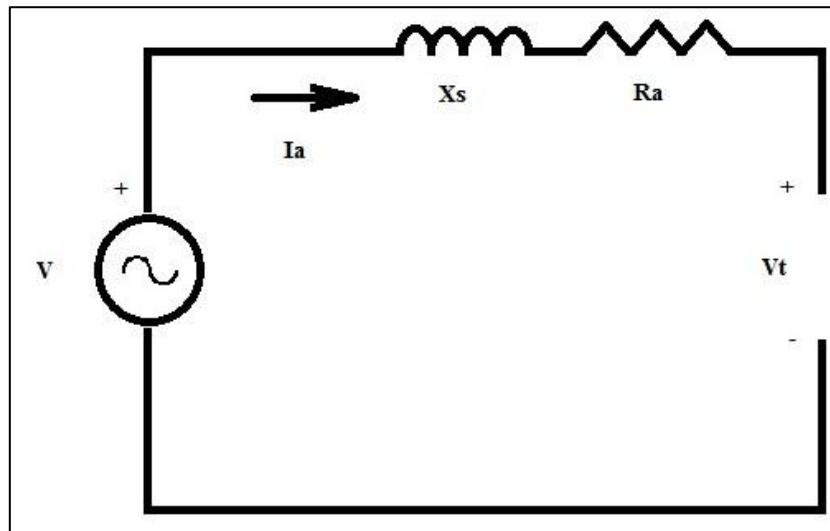


Figura 2.9. Circuito equivalente por fase máquina síncrona rotor cilíndrico [17]

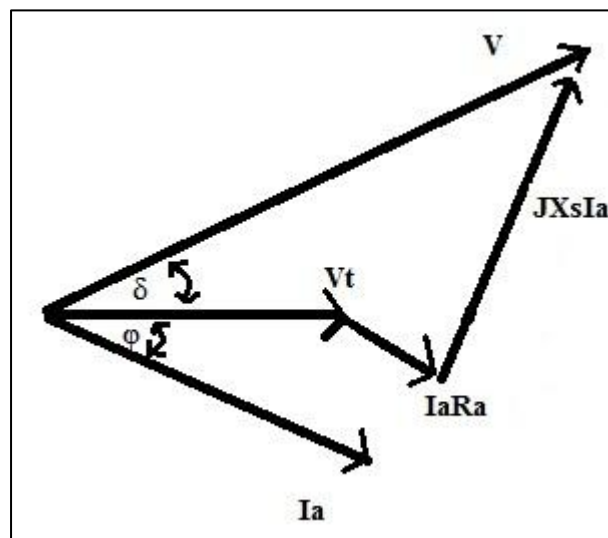


Figura 2.10. Diagrama fasorial máquina síncrona rotor cilíndrico [17]

Del circuito y el diagrama fasorial se vislumbran las ecuaciones de voltaje de salida de la máquina V_t [17].

$$V_t = V - (jX_s + R_a) * I_a \quad (2.5)$$

Donde:

V_t = Tensión total por fase generada por la máquina.

V = Tensión interna generada.

X_s = Reactancia síncrona.

R_a = Resistencia de armadura.

I_a = Intensidad de armadura.

La potencia activa en la máquina síncrona la expresa la ecuación (2.6) [17].

$$P = V_t * I_a * \cos \varphi = \frac{V_t * V}{X_s} \sin \delta \quad (2.6)$$

Donde:

P = Potencia activa.

V_t = Tensión total por fase generada por la máquina.

I_a = Intensidad de armadura.

φ = Angulo entre tensión interna (V) e intensidad de armadura (I_a).

δ = Angulo de torque entre las f.m.m del estator y rotor.

Para la potencia reactiva se tiene [17]:

$$Q = V_t * I_a \sin \varphi = \frac{V_t * V}{X_s} \cos \delta - \frac{V_t^2}{X_s} \quad (2.7)$$

Donde:

Q = Potencia reactiva.

En consecuencia la generación a partir de un generador de imanes permanentes en aerogeneradores no solamente es afectada por la velocidad del viento que es la fuente de potencia mecánica, también por el diseño del generador tanto en su forma de construcción como el tamaño y demás características, sino que además del tipo de material que se emplea en la construcción de los imanes del generador

2.2.4.- Protecciones Eléctricas Comunes en Generadores.

La protección en un sistema eléctrico es fundamental para garantizar el correcto funcionamiento de este, todo tipo de instalación eléctrica requiere un sistema de protección adecuado para ella ya sea en generación, transmisión y distribución. Tanto una simple vivienda como una central de generación de gran potencia necesitan de protecciones, y tienen en común el uso de tres tipos de protecciones las cuales son necesarias e imprescindibles en cualquier instalación eléctrica, estas son:

- Protección contra Sobrecorriente.
- Protección contra Sobretenión.
- Protección contra Electrocución.

Estas protecciones son básicas para el resguardo del equipo eléctrico y de las personas que trabajan en él.

Los generadores son el equipo de mayor costo del sistema eléctrico de potencia y están regularmente sometidos a condiciones indeseables por ende deben estar resguardados ante cualquier tipo de falla que presenten, las cuales se presentan de manera abrupta en cualquier momento esto es controlado en cierto grado mediante la mantención preventiva de la máquina.

Se requiere considerar muchos casos de condiciones anormales que pueden llevar a la salida de servicio del generador o a su completa destrucción, estas condiciones pueden ser:

- El sobrecalentamiento.
- Fallas en devanados.
- Sobre velocidad y baja velocidad.
- Pérdida de la excitación.
- Motorización.
- Corriente de operación desbalanceada.
- Oscilación con o sin pérdida de sincronismo.
- Energización inadvertida.
- Conexión no sincronizada.

Las protecciones de un generador dependen de varios factores como tipo de sistema en cual se encuentra el generador, tipo de generador, tiempo promedio de uso, etc. Esto es coherente al ingeniero que diseñe el sistema de protecciones y también al operador del sistema de potencia. Los sistemas de protección en generadores varían con relación a las necesidades, ya sea la desconexión automática en caso de falla o un aviso de alarma para poder controlar el caso de falla sin la necesidad de desconectar el generador evitando con ello, la salida de servicio.

Los dispositivos básicos de protección eléctrica para generadores pequeños, según la norma IEEE 242 2001:

- Dispositivo de sobre corriente.
- Dispositivo temporizado de sobre corriente a tierra.
- Dispositivo de potencia inversa.
- Dispositivo de campo.
- Dispositivo de protección diferencial.

En el caso de los aerogeneradores son de interés los casos que pueden ser perjudiciales para la utilidad del parque eólico y para el personal operador. Una variedad de dispositivos de protección pueden ser incluidos en el sistema de protecciones de un aerogenerador, no se deben olvidar las reacciones comunes de las máquinas rotatorias como la sobrecorriente en la partida de un motor de inducción, o la presencia de potencia inversa durante las pausas de viento y que es

necesario mantener una cierta velocidad de giro en las aspas para un correcto funcionamiento del sistema.

En consecuencia aparte de las protecciones comunes a manejar en un SPE, (Sistema de Protecciones Eléctricas), de cualquier sistema de generación también se deben considerar los casos particulares que puede presentar el recurso viento que es la base de la generación eólica

2.2.4.1.- Protecciones Eléctricas Comunes en Generadores Síncronos.

En base a la perspectiva de protección los generadores constituyen una clase especial de aparato en el sistema eléctrico, aunque las fallas son raras estas podrían ser de carácter destructivo, en las protecciones a utilizar se debe considerar el tipo de generador ya sea utilizado en sistemas hidráulicos, eólicos, a vapor. etc. Por ejemplo en una turbina hidráulica no es necesaria una protección de variación de frecuencia en cambio en una turbina a vapor es una protección primaria.

2.2.4.1.1.-Protección Térmica del Estator.

La protección a base de temperatura acusa cuando se presenta una sobrecarga, falla en el sistema de refrigeración, puntos calientes debido al fracaso de la aislación.

Un generador puede funcionar sin problemas con una variación del 5% en su tensión de salida sin provocar una falla por temperatura, en condiciones de emergencia para el generador es posible soportar niveles altos de corriente por un tiempo dado, de acuerdo con la norma ANSI C50.13-1989 [5,9].

Tiempo(s)	10	30	60	120
Corriente armadura (%)	226	154	130	116

La temperatura es registrada por sensores los utilizados comúnmente son: resistencias y transformadores de corriente, los cuales monitorean el sistema de enfriamiento.

La sobrecorriente es una causa típica de alta temperatura esta es controlada mediante relés de sobrecorriente con características instantáneas y de tiempo altamente inverso.

El elemento instantáneo [5, 9]:

$$115\%I_n \leq I \quad (2.8)$$

El elemento inverso [5, 9]:

$$7 \text{ s a } I_{\max} = 226\%I_n \quad (2.9)$$

Los puntos calientes en un generador pueden ser provocados por fallas en el aislamiento de laminación, por vibraciones, objetos extraños, o por objetos que son parte de la máquina, los medios para detectar estos puntos son a través de sensores posicionados en lugares estratégicos ya que no se puede llenar el generador de sensores. La protección contra puntos calientes es normalmente utilizada en grandes turbinas a vapor emitiendo una señal de alarma.

2.2.4.1.2.-Protección Contra Fallas del Estator.

Las fallas en el estator pueden ser tanto de una fase como de las tres y son resguardadas mediante el relé diferencial (ANSI 87), este relé funciona a base de transformadores de corriente los cuales son conectados de distinta manera dependiendo de la configuración del generador sea en delta o estrella.

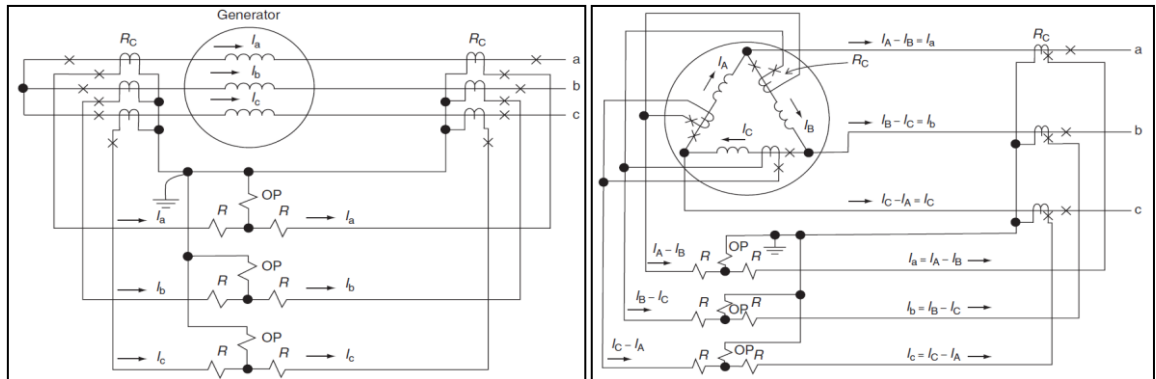


Figura 2.11. Conexión de TC para generador en estrella y delta [2]

En generadores pequeños la configuración comúnmente usada es la siguiente:

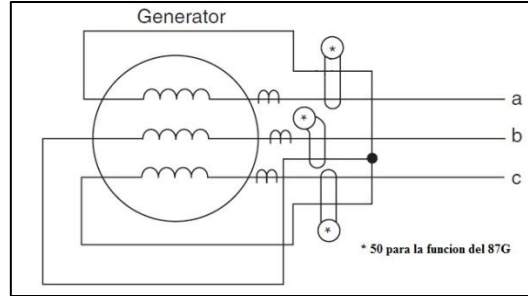


Figura 2.12. Protección diferencial para generadores pequeños a base de TC y sobrecorriente instantáneos. [2]

La configuración presentada, (figura 2.12), puede ser utilizada en cualquier tamaño de generador. Esta presenta relés diferenciales (87) los cuales son ajustados a una sensibilidad típica del 10%-25%, el pick de corriente del relé está cerca de 0,14-0,18 [A] para los de sensibilidad del 10% en cambio para los de 25% se encuentran en 0,50 [A]. La operación del relé debe ser rápida en abrir los interruptores, la desenergización instantánea de las fallas no es posible siempre constan con un pequeño tiempo de retardo.

El relé compara las corrientes de entrada y salida del bobinado del estator del generador de la siguiente forma:

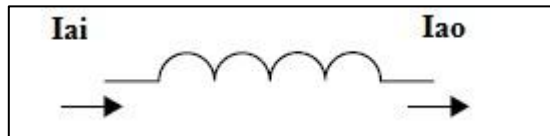


Figura 2.13. Corriente en una bobina del generador [5]

Donde:

$$I_k = \frac{|I_{ai}| + |I_{ao}|}{2} \quad (2.10)$$

El corriente de operación se produce una diferencia entre las corrientes de entrada y salida [3].

$$I_{op} = |I_{ai} - I_{ao}| \quad (2.11)$$

El relé despeja la falla en la siguiente condición [3]:

$$I_k \geq k * I_{op} \quad (2.12)$$

Donde:

I_k = Relación corriente entrada-salida.

I_{ai} = Corriente de entrada de la bobina del estator.

I_{ao} = Corriente de salida de la bobina del estator.

I_{op} = Corriente de operación del relé.

k = Porcentaje diferencial.

2.2.4.1.3.-Protección del Bobinado de Campo del Rotor.

El circuito de campo de un generador (bobinado campo, excitatriz, interruptor de campo), es un circuito DC por lo cual no necesita tierra, si ocurre una falla a tierra no pasara corriente y el generador funcionará normalmente más si una segunda falla en un lugar distinto ocurre se provocara un flujo de corriente lo suficientemente alto para provocar daños en el rotor y la excitatriz. Si una gran sección de la bobina de campo es cortocircuitada podrían haber desequilibrios que originarían fallas mecánicas en el rotor, actualmente existen tres formas de proteger los generadores de este tipo de falla.

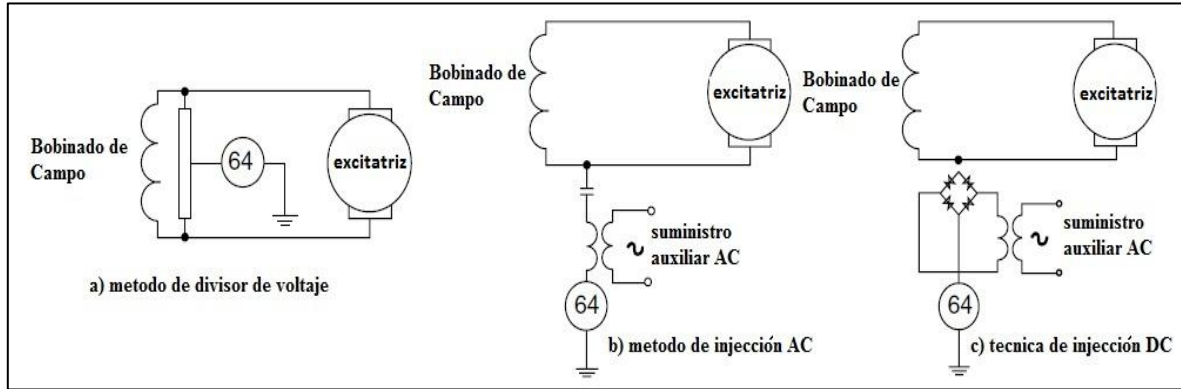


Figura 2.14. Técnicas de protección falla a tierra del circuito de campo [5]

La primera técnica (a) consiste en conectar una resistencia en paralelo con el devanado de campo. El punto central resistencia se conecta la tierra a través de un relé de sensibilidad. Si un punto del circuito de campo va a tierra, el relé se accionará por la corriente que pasa por él. El principal defecto de esta técnica es que si se presenta una falla en el centro del bobinado de campo no será detectada

La segunda técnica (b) consiste en aplicar un voltaje de CA a través de un punto de campo. Si la bobina de campo se va a tierra en algún lugar, una corriente alterna pasa por el relé provocando que este actúe.

La tercera técnica (c) consiste en inyectar una corriente continua en lugar de un voltaje de corriente alterna. La consecuencia es la misma si el circuito de campo va a tierra en algún lugar.

La mejor protección contra fallas a tierra sobre el terreno es mover el generador fuera de servicio tan pronto como la falla a tierra se detecte.

2.2.4.1.4.-Protección Contra la Pérdida de Excitación.

La pérdida de excitación ocurre cuando la corriente de campo deja de ser suministrada al generador y se pueden dar las siguientes reacciones del generador

-Al perder la fuente de campo el poder real del generador se mantiene por un corto tiempo, pero con la caída de la tensión, la tensión de salida también cae y la máquina trata de

compensar la caída de la tensión aumentando la corriente en proporciones consecuentes a la caída del voltaje.

- El generador puede caer en baja excitación y absorberá cada vez más potencia reactiva
- La proporción de la tensión sobre la corriente se hace cada vez más pequeña, dejando a la corriente de fase por encima de la tensión de fase, provocando que la impedancia de secuencia positiva medida en los terminales pase al segundo cuadrante, la experiencia en distintos generadores muestra que la impedancia de secuencia positiva adoptara un valor entre X_d y X_q (eje directo y de cuadratura)

La técnica de protección más popular contra la pérdida de excitación es utilizar un relé offset-mho como se muestra en la figura. El relé lee en los terminales del generador las tensiones y corrientes de secuencia positiva, y normalmente se asocia con un retraso de tiempo definido.

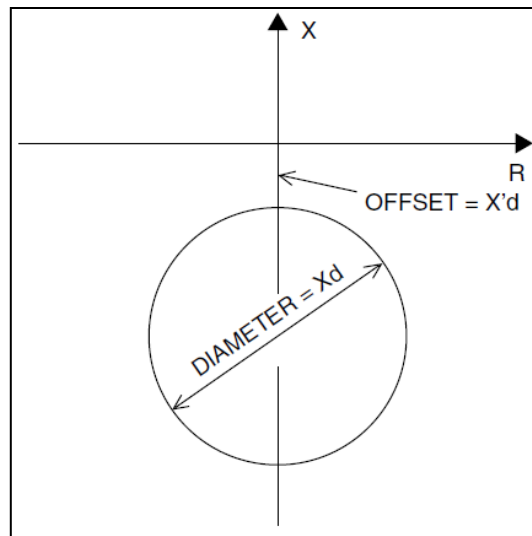


Figura 2.15. Característica del relé offset-mho [5]

En máquinas pequeñas es común el uso de un solo relé que comúnmente cuenta con las siguientes características, se muestra, (figura 2.15), que el diámetro es la reactancia síncrona de la máquina (X_d) y el desplazamiento es igual a el medio de la reactancia transitoria (X'_d), el tiempo de retardo del relé fluctúa entre 0,5 y 0,6 segundos.

Es común encontrar en pequeños generadores, relés de pérdida de campo que pueden funcionar mediante la detección de la magnitud de corriente de campo, o por un detector del flujo de potencia reactiva en el generador o por la detección del ángulo del factor de potencia por encima de un cierto ángulo, pero los relés de distancia como el offset-mho son los que dan mayor seguridad a la máquina.

2.2.4.1.5.-Protección Antimotoreo.

Desde el punto de vista de un sistema eléctrico el motoreo se define como el flujo de potencia real cuando un generador actúa como motor.

Si el suministro de energía mecánica se retira cuando el generador está conectado al sistema eléctrico y el campo excitado, el sistema impulsará la máquina en forma de motor asíncrono. Se encuentran valores típicos de potencia inversa, en relación de porcentaje con respecto a la potencia real del generador, que se requieren para hacer girar un generador a la velocidad síncrona en algunos tipos de turbina son:

- Las turbinas de vapor, con condensación 1% al 3%.
- Las turbinas de vapor, sin condensación +3%.
- Hidroturbinas de -0,2% +2%.
- Motores diesel $\pm 25\%$.
- La turbina de gas +50%.

El uso de un relé de dirección de potencia (ANSI 32), es necesario para la correcta protección, existen relés de microprocesador en los cuales se encuentra una sensibilidad típica de 1mA y con un tiempo de funcionamiento aproximadamente de 2 segundos.

2.2.4.1.6.-Protección Contra Falla del Interruptor.

Las fallas en el interruptor del generador son consecuencia de cualquier falla en el sistema pues al producirse una falla un elemento de protección emite una señal para que el interruptor se

abra si luego de un tiempo determinado la falla no es despejada se asume que el interruptor no se ha abierto entonces una señal le indica a los interruptores de reserva que se abran.

Cada interruptor que conecta el generador al sistema del cual participa debe ser monitoreado con respecto a producirse fallas del mismo.

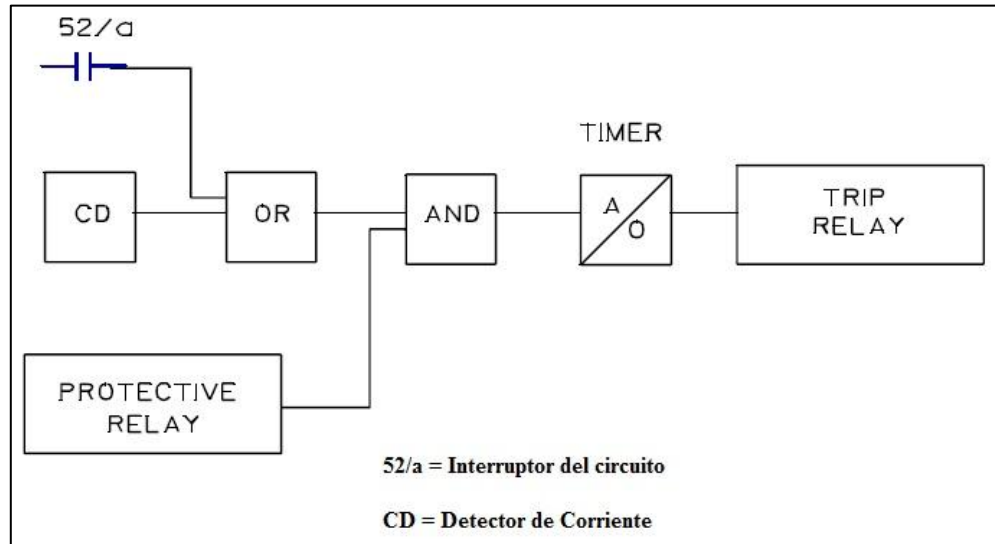


Figura 2.16. Diagrama funcional de la zona de falla del interruptor [8]

2.2.4.1.7.-Protección Contra Energización Inadvertida.

La Energización inadvertida puede producir fallas de consecuencias catastróficas, esta es producida por el fallo humano, control, etc.

La utilización de un relé de sobrefrecuencia (81 ANSI) monitoreando las tres fases, más relés de sobrecorriente (50 ANSI) en cada fase son el método más común en este tipo de protección.

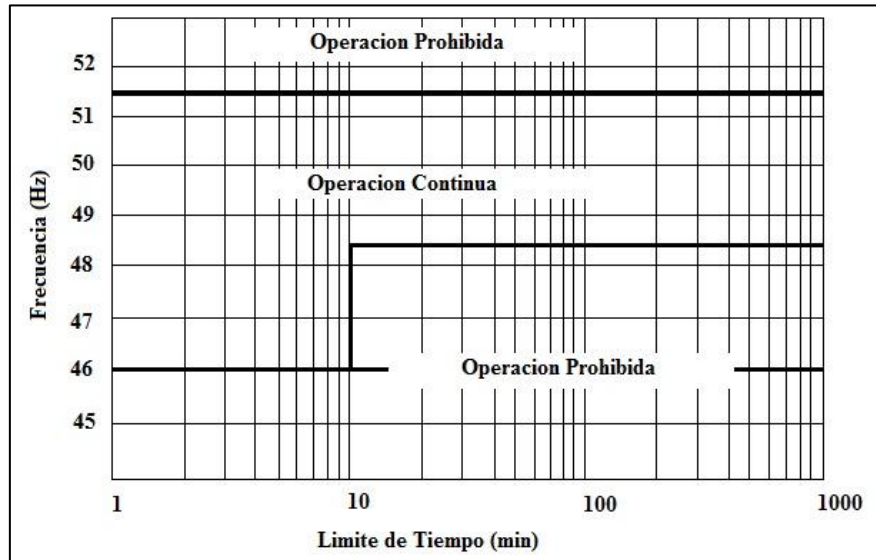


Figura 2.17. Características típicas protección de frecuencia [5]

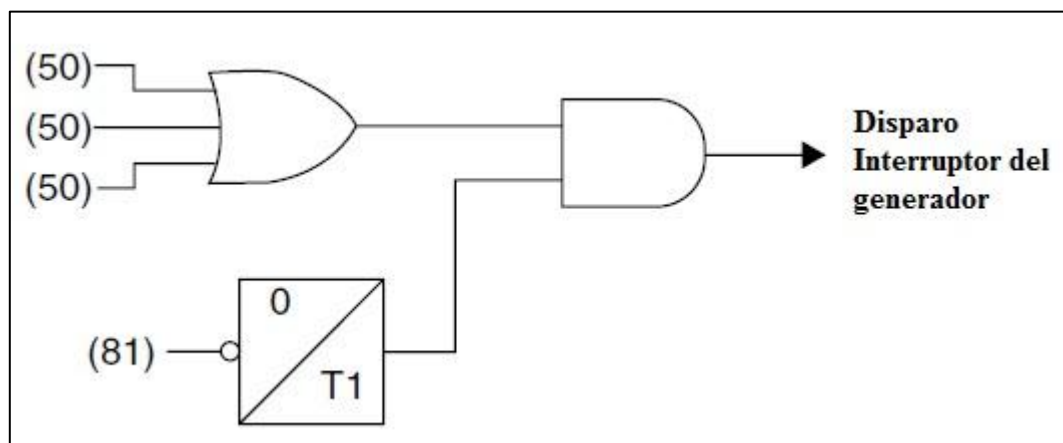


Figura 2.18. Esquema protección contra energización inadvertida [5]

2.2.4.2.- Protecciones Eléctricas en Generadores Pequeños.

Al ser un generador pequeño no implica que este no tenga fallas o que las corrientes de falla sean lo suficientemente grandes como para ocasionar graves daños en la máquina. Más bien

las aplicaciones de los generadores pequeños requieren de protecciones robustas pues la utilización de estos como base de la generación en sistemas aislados es de mucha importancia.

Según los estándares de la IEEE los dispositivos de protección mínimos para un generador pequeño en un sistema aislado son los siguientes:

- 51V relé de sobrecorriente con restricción de tensión.
- 51G relé temporizado de sobrecorriente a Tierra.

Se adicionan protecciones cuando en un sistema aislado se encuentran varias máquinas las cuales son:

- 32 relé de potencia inversa.
- 40 relé potencia reactiva inversa.
- 87 relé protección diferencial.

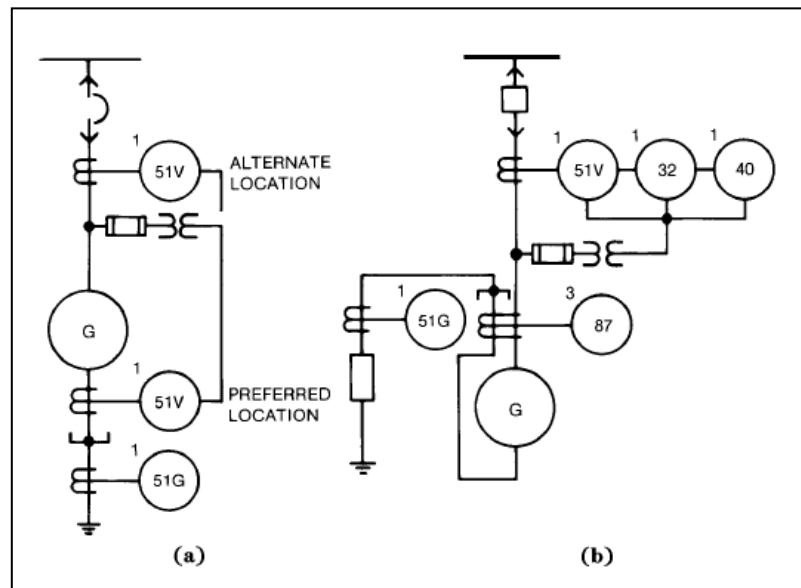


Figura 2.19. Relés típicos para la protección de generadores pequeños [9]

(a) Configuración para un único generador en un sistema aislado

(b) Configuración para varios generadores en un sistema aislado

2.2.4.3.- Protecciones Eléctricas en Sistemas Eólicos Aislado.

Se pueden presentar muchos casos de falla en un aerogenerador pues en esencia es una máquina eléctrica rotatoria con lo que conlleva todas sus posibles fallas, en un aerogenerador trabajando para un sistema aislado es de mucha importancia la ocurrencia de sobrevoltajes debido a ráfagas de viento u tormentas o una demanda reducida de energía en contra de una gran oferta.

En el sistema eléctrico en el cual se encuentra un pequeño generador eólico debe existir un sistema de protecciones capaz de asegurar la protección contra un funcionamiento defectuoso tanto del aerogenerador como del sistema eléctrico al cual se encuentra conectado. También debe permitir desconectar el sistema de toda fuente de energía para llevar a cabo mantención o pruebas eléctricas.

La actuación del sistema de protección viene a partir del fracaso del sistema de control o a los efectos de una falla interna, externa o un acontecimiento peligroso, los niveles de activación de este sistema deben ser ajustados de tal forma que los límites de diseño no sean excedidos, nunca deben permitir que el generador sobrepase su velocidad máxima de giro o que funcione en un estado inseguro de operación.

El sistema de protección está sobre el sistema de control, pero nunca sobre la parada de emergencia en cuanto a accesos a los sistemas de frenado y desconexión. Según la norma IEC 61400-2 las turbinas que excedan los 40m^2 en su área de barrida deben ser equipadas con un interruptor de cierre manual en los casos que el área de barrida no exceda los 40 m^2 no se requiere, pero siempre es recomendable el uso de un interruptor de cierre manual.

El sistema de protección debe ser activado cuando existen los siguientes casos

- Sobrevelocidad.
- Sobrecarga del generador o falla.
- Vibración excesiva.
- Torcedura del cable.

El sistema de protecciones debe ser capaz de trabajar en cualquier tipo de control del sistema ya sea en manual o automático.

Se debe contar con un sistema de frenado del aerogenerador para la realización de mantenimiento esto debe ser realizado en ciertas condiciones de velocidad del viento la cual no puede exceder $0,5V_{ave}$ (V_{ave} , media anual de la velocidad del viento a la altura del centro del rotor), el mantenimiento para pequeñas turbinas de viento puede ser realizado bajando el aerogenerador a tierra. Si el mantenimiento es realizado encima de la torre, entonces debe haber un medio de prevenir el movimiento del rotor y el movimiento de aspas antes de que el mantenimiento sea realizado.

Existen y se utilizan diversos aparatos eléctricos para garantizar la protección eléctrica, tanto del sistema como de las personas que trabajan en el

- Interruptores.
- Interruptores Automáticos.
- Contactores.
- Fusibles.
- Relés.
- Varistores.

Estos son utilizados para las protecciones contra sobrecorriente, sobretensiones, electrocución.

Las protecciones de sobrecorriente y sobrevoltajes son encargadas de proteger al equipo eléctrico en sí, en cambio la protección de electrocución están encargada de proteger a los seres humanos y animales.

2.2.4.3.1- Protecciones Contra Sobrecorriente.

La sobre corriente encuentra su origen en la sobrecarga o en el cortocircuito y se define como cualquier corriente cuyo valor es más alto que la corriente nominal del circuito, el funcionamiento de la protección contra sobrecorriente se basa en controlar la intensidad del circuito protegido. Cuando dicha intensidad sobrepasa un valor prefijado, el dispositivo de protección realiza una acción (apertura del circuito, señal de alarma, etc.).

En sobrecargas

- La intensidad nominal del interruptor automático I_n estará comprendida entre la intensidad de cortocircuito I_{sc} y la intensidad de carga admisible I_{ca} , de tal forma que se cumpla [9]:

$$I_{sc} \leq I_n \leq I_{ca} \quad (2.13)$$

- La condición de desconexión se deberá cumplir cuando la intensidad convencional de desconexión o intensidad más retardada I_{cd} sea menor o igual a 1,45 veces de la intensidad de carga admisible I_{ca} , como se puede ver a continuación [9]:

$$I_{cd} \leq 1,45 * I_{ca} \quad (2.14)$$

En cortocircuito

- Se cumple la condición de que la energía de paso de antes del despeje de la falta ($I_{cc}^2 * t_{desp}$) debe ser menor que la intensidad de corto soportada por el conductor (I_{cu}), que se calcula de la forma siguiente [9]:

$$I_{cu} = K_1^2 * S^2 \quad (2.15)$$

Donde:

K_1 = Valor de corrección del material.

S = Sección del conductor en mm^2 .

2.2.4.3.2- Protecciones Contra Sobretensión.

Se puede dar el caso de que la sobretensión es producida por una descarga atmosférica la cual produce un aumento del valor de la tensión a valores muy altos durante un transitorio de

pocos milisegundos, causadas por la caída o inducción en la línea de un rayo, (mas eso se analizará en el párrafo 2.3).

Por parte de la máquina eléctrica rotatoria voltajes excesivos en los terminales pueden ser producidos por el rechazo de carga sin la necesidad que se supere el límite en la relación de voltaje frecuencia de la máquina, los excesos de velocidad de rotación pueden llegar a alcanzar un aumento del 200% bajo esta condición de relación voltaje frecuencia la sobreexcitación puede no resultar excesiva, la tensión sostenida se puede encontrar sobre los niveles admisibles, este problema en general es controlado por el sistema de regulación de velocidad y el sistema de regulación de tensión, por lo cual no se presenta en todos los distintos tipos de turbinas.

La norma C37-102. Recomendando el uso de un relé con un elemento instantáneo y un elemento inverso. En la nomenclatura ANSI se le conoce con el número 59.

El elemento instantáneo [5]:

$$130\%V_n \leq V \leq 150\%V_n \quad (2.16)$$

El elemento inverso [5]:

$$110\%V_n = V \quad (2.17)$$

2.2.4.3.3- Protecciones Contra Electrocución.

Se puede dar el caso de que una persona muera por contacto directo como indirecto con el sistema eléctrico, con esta protección se busca prevenir que una persona quede sometida a una tensión por un tiempo que ocasione daño en su organismo. El contacto directo es cuando una persona toca una parte energizada del sistema eléctrico.

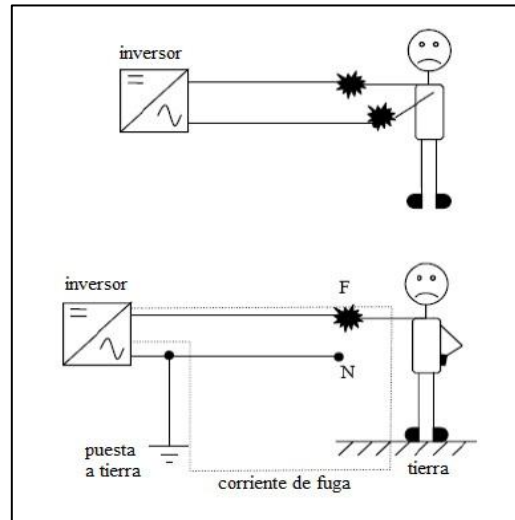


Figura 2.20. Ejemplo contacto directo [19]

El contacto indirecto es cuando se tocan partes conductoras como la carcasa metálica de cualquier equipo eléctrico, estos no deberían presentar energía pero ocurre la posibilidad de alguna falla eléctrica como la de aislación con lo cual estas carcassas podrían estar energizadas.

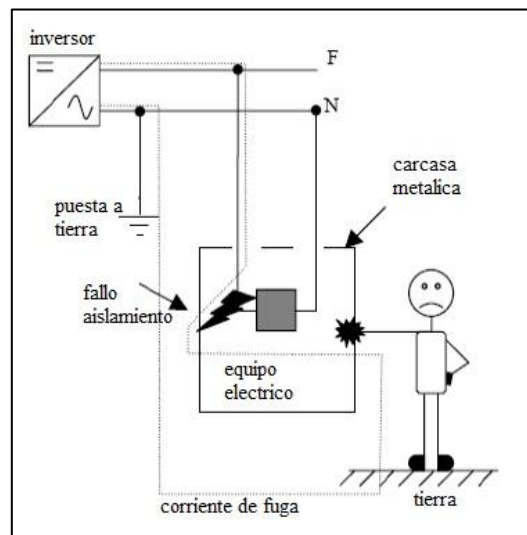


Figura 2.21. Ejemplo contacto indirecto [19]

La magnitud de daño al cuerpo humano depende principalmente del nivel de corriente al cual es sometido y del tiempo que dura el paso de ésta por el cuerpo, el daño puede variar de la no reacción al estímulo eléctrico como a la fibrilación ventricular.

Tabla 2.5. Efectos fisiológicos de la corriente eléctrica [15]

Tipo	Efectos fisiológicos
1	Habitualmente no hay reacción
2	Habitualmente no hay efectos molestos
3	Habitualmente no hay daño orgánico Posibilidad de contracciones musculares y dificultad respiratoria para duración mayor a los 2 segundos, Perturbaciones cardiacas
4	Riesgo de fibrilación ventricular

Estos efectos están asociados a curvas tiempo/corriente tanto para continua como para alterna.

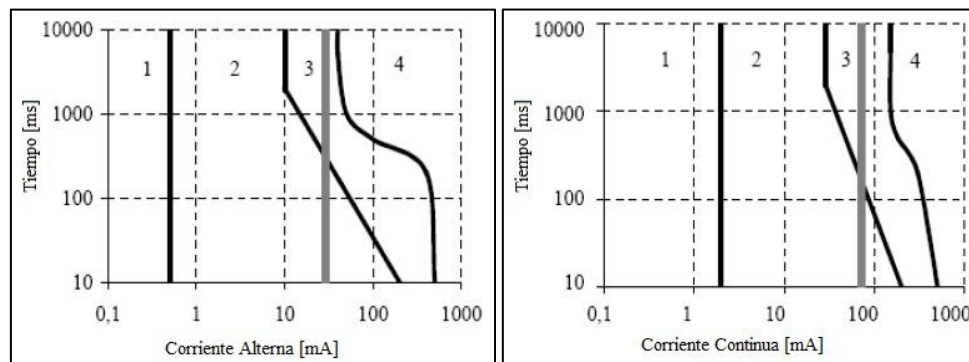


Figura 2.22. Curvas tiempo/corriente [19]

Las protecciones contra electrocución caracterizan sus parámetros mediante la tensión de contacto, que es el producto entre corriente que recorre el cuerpo y la impedancia que presenta el mismo. La impedancia del cuerpo humano característica del individuo y varia con respecto a la humedad, zona de contacto, humedad de la piel, fisionomía de la persona, etc. (NCH Elec. 4/2003). Por lo cual es imposible conocer un valor exacto de ésta, se toma como valor de esta impedancia un promedio estadístico que supera el 95% de la población y que asume como contacto las dos manos y camino recorrido hacia tierra por ambos pies, sin humedad. Se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$z_t[\Omega] = 1.000 + \frac{1}{2} * z_{t,95\%}[\Omega] \quad (2.18)$$

Donde:

Z_t = Impedancia total del cuerpo humano.

1.000= Valor de la resistencia de contacto en Ω .

$Z_{t,95\%}$ = Es la impedancia que supera el 95% de la población.

La protección contra el contacto directo pasa por que las partes energizadas del sistema sean accesibles para los usuarios. En general, la protección contra el contacto directo es requerida cuando la tensión exceda de 25 V en corriente alterna y 60 V corriente continua, en la zona de corriente alterna del sistema se utilizan diferenciales con una sensibilidad de 30 mA como medida de protección adicional o más resguardo para las personas. En la protección contra el contacto indirecto existen niveles de protección contra el choque eléctrico de estos equipos los comunes son los de la clase I y la clase II, los equipos de la clase I tienen partes metálicas en las cuales puede aparecer una corriente debido a fallo del aislamiento, en la clase II existe un aislamiento doble con lo cual se pretende evitar la aparición de una corriente en la cubierta exterior

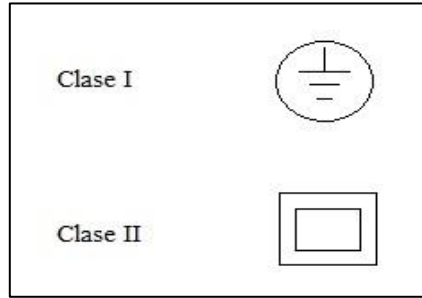


Figura 2.23. Símbolos de las clases de protección contra contacto indirecto [19]

La protección contra la electrocución por contacto indirecto se debe manejar de acuerdo al tipo de corriente, en forma diferente para continua como para alterna.

- Corriente alterna

Esta protección se basa en dos tipos de sistema puesto a tierra o aislados de tierra, estas configuraciones pueden ser utilizadas en equipos de ambas clases, consiste en conectar a tierra la carcasa del equipo de clase I y el neutro, existen múltiples sistemas de conexión a tierra los cuales son normados por la norma internacional IEC-60364.

- Corriente Continua

La protección del lado de continua cuenta con un valor límite de tensión que es de 120V. Por tanto si esta tensión es superada en algún punto, se deben poner protecciones, las cuales son las mismas que para el contacto directo.

2.3.- Protección Contra Descargas Atmosféricas.

2.3.1.- Introducción.

Los aspectos físicos del origen de las descargas atmosféricas no se conocen en estos momentos sin embargo se pueden estimar el número de descargas en una zona determinada a base de datos climáticos de la misma.

Las protecciones contra descargas atmosféricas son de suma importancia debido a la cantidad de daño que pueden producir en el aerogenerador. Al ser tocado por un rayo se puede producir un arco eléctrico en el interior del aerogenerador el cual causa daños en la estructura y en el sistema eléctrico que muchas veces son irreparables. El riesgo de impacto por rayos en una estructura es función de la altura de ésta, la topografía, el nivel local de actividad de rayos. Por este motivo un sistema de protección contra rayo (SPR) eficiente alargaría la vida útil del sistema eólico, debiéndose contar además con un sistema de puesta a tierra efectivo que permita dirigir las descargas a tierra de forma segura tanto para la estructura como para los seres humanos. Los SPR generalmente están contruidos por dos subsistemas uno externo y uno interno:

SPR Externo: Es un sistema de terminación aérea para interceptar al rayo con un sistema de conductores bajantes para conducir la corriente del rayo hasta el sistema de puesta a tierra para ser dispersada.

SPR Interno: Son las medidas que se toman para reducir los efectos electromagnéticos de la corriente del rayo dentro del espacio a proteger como conductores formando anillos equipotenciales, separación física de las partes conductoras de la corriente del rayo, apantallamiento y dispositivos de sobretensiones.

2.3.2.- El Rayo.

Los rayos tienden a caer en el punto de mayor altura de una zona determinada, por esta razón los aerogeneradores tienden a ser un blanco natural debido a su elevada altura como también la zona elevada donde comúnmente se encuentran.

La cantidad de rayos en una zona varía de acuerdo al país, como de una región a otra, además de variar con respecto a la estación del año. Los rayos son tanto de polaridad negativa como positiva y se pueden propagar tanto de una nube a tierra como de tierra a nube.

2.3.2.1.- El Origen del Rayo.

El rayo es uno de los espectáculos más extraordinario y peligroso de la naturaleza tan destructivo como cautivador, es impredecible y de una duración que puede alcanzar unos pocos segundos, casi nunca se presenta en la forma de una línea recta sino más bien con muchas ramificaciones en su estructura.

Un rayo en si se puede suponer como una fuente natural de corriente, el valor máximo registrado ha alcanzado los 300 kA, la fuerza del rayo sin embargo varía dependiendo del tipo de rayo y el lugar geográfico en el cual se produce, el valor promedio con el cual se presentan es de 30 kA que es suficiente para ocasionar graves daños materiales como personales.

Los rayos principalmente se pueden clasificar en dos grupos los de nube a nube y de nube a tierra, estos a su vez suelen dividirse en sub grupos como en el caso de los nube a nube que se pueden presentar de la forma intra-nube que es cuando se produce el rayo entre zonas de diferente potencial eléctrico dentro de una misma nube, es el de mayor ocurrencia.

La forma inter-nube es el caso de la producción de un rayo entre distintas nubes, en la familia de los rayos nube a tierra, que es el caso de mayor peligro para la vida y los bienes materiales, se puede vislumbrar los casos en que el rayo es de origen descendente nube-tierra y los de origen ascendente tierra-nube.

El rayo es una descarga electrostática natural, pueden contener energías en la forma positiva como negativa, se producen comúnmente durante una tormenta eléctrica, también puede ser producido por nubes de cenizas volcánicas e inclusive por incendios forestales, el rayo genera un "pulso electromagnético". La emisión de luz que produce la descarga eléctrica del rayo

es denominada relámpago, causada por el paso de corriente eléctrica que ioniza las moléculas de aire, y por el sonido del trueno, desarrollado por la onda de choque. La electricidad que pasa a través de la atmósfera calienta y expande rápidamente el aire, produciendo el ruido que se denomina trueno.

Generalmente, los rayos son producidos por partículas positivas por la tierra y negativas a partir de nubes de desarrollo vertical llamadas cumulonimbos (son nubes de gran desarrollo vertical, que internamente esta formadas por una columna de aire cálido y húmedo que se eleva en forma de espiral rotatoria que tiene un sentido anti horario en el hemisferio norte y horario en el hemisferio sur). Cuando un cumulonimbo alcanza la tropopausa (es la zona de transición entre la troposfera y la estratosfera. Marca el límite superior de la troposfera, sobre la cual la temperatura se mantiene constante antes de comenzar nuevamente aumentar sobre los 20 km sobre el nivel del mar. Esta situación térmica evita la convección del aire y confina de esta manera el clima a la troposfera), las cargas positivas de la nube atraen a las cargas negativas, causando un relámpago o rayo, esto produce un efecto de ida y vuelta; se refiere a que al subir las partículas instantáneamente las personas cuando observan un rayo lo que ven es el retorno de las partículas quedando con la impresión de que el rayo baja.

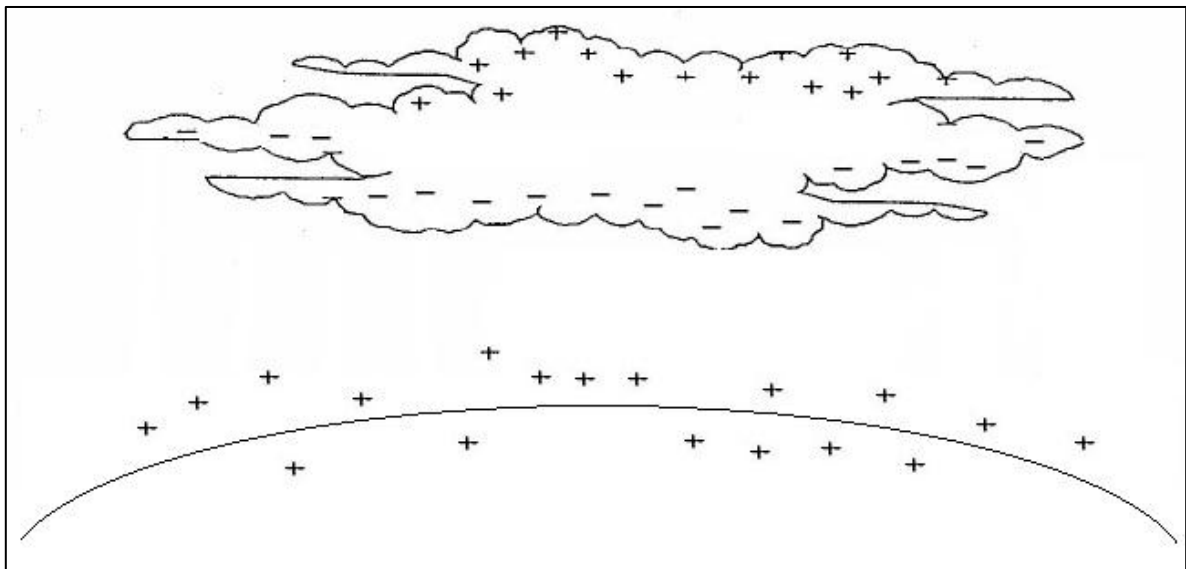


Figura 2.24. Formación del rayo cargas en nube y cargas inducida en tierra [11]

Las nubes de tormenta son cuerpos acuosos cargados eléctricamente, durante las tormentas se producen separación de cargas dentro de las nubes. El potencial, que generalmente alcanzan es de 100 millones de volts con un campo electrostático resultante de 10 kV por metro de elevación desde la superficie terrestre, generalmente la separación de cargas en la tormenta deja a la nube con cargas negativas en su base y positivas en la cima, pero ocasionalmente se puede dar el caso de que las cargas positivas estén en la base y las negativas en la cima, cada rayo varía dependiendo de las variaciones naturales de la tormenta que los produce.

Las cargas en la nube generan una carga inducida de polaridad contraria al de la base de la nube en la tierra la concentración de carga inducida se considera de igual tamaño que la base de la nube (sombra). Mientras la tormenta aumenta su intensidad la separación de cargas continua hasta un punto en donde el aire entre la nube y tierra no puede cumplir su función de dieléctrico y se forma una guía discontinua entre la nube y la tierra en pasos de varias decenas de metros y con un intervalo de tiempo de aproximadamente de 50 ms, lo que da paso a la formación del paso líder seguido por un intenso rayo de retorno de una gran luminosidad que es lo que distingue el ojo humano.

La mayoría de los rayos nube-tierra son de carga negativa 90% aproximadamente y el otro 10% son de carga positiva, presentando estos los parámetros eléctricos de mayor intensidad.

2.3.2.2.-Tipos de descarga atmosférica.

El tipo de descarga atmosférica es distinguido básicamente por ser descargas ascendentes o descendentes y ambos tipos de rayos son subdivididos dependiendo de la polaridad de la carga que se pueden presentar en forma negativa como positiva.

- Rayos positivos nube-tierra:

Son descargas descendentes originadas en la región de carga positiva de una nube y son el tipo de rayo que se presenta con menor frecuencia 10% de los casos.

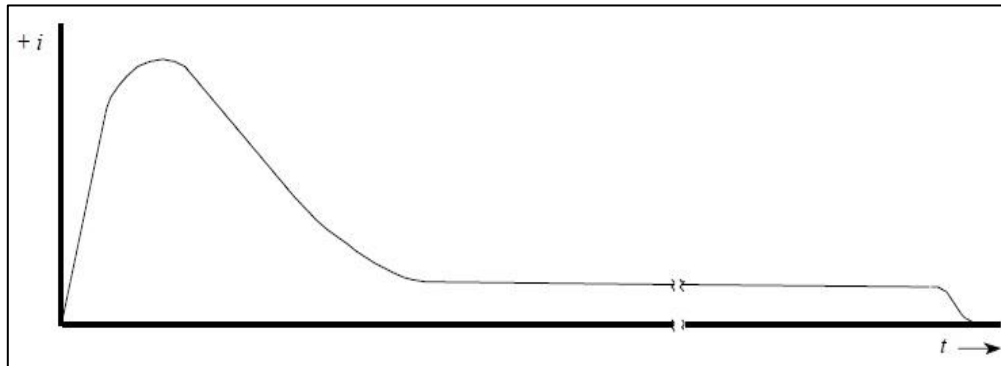


Figura 2.25. Perfil típico rayo positivo nube-tierra [12]

Un rayo positivo nube-tierra consiste principalmente de un solo impacto de retorno el cual puede ser seguido por una corriente continua.

- Rayos negativos nube-tierra:

Son descargas descendentes originadas en la región de carga negativa de una nube y son el tipo de rayo que se presenta con mayor frecuencia 90% de los casos.

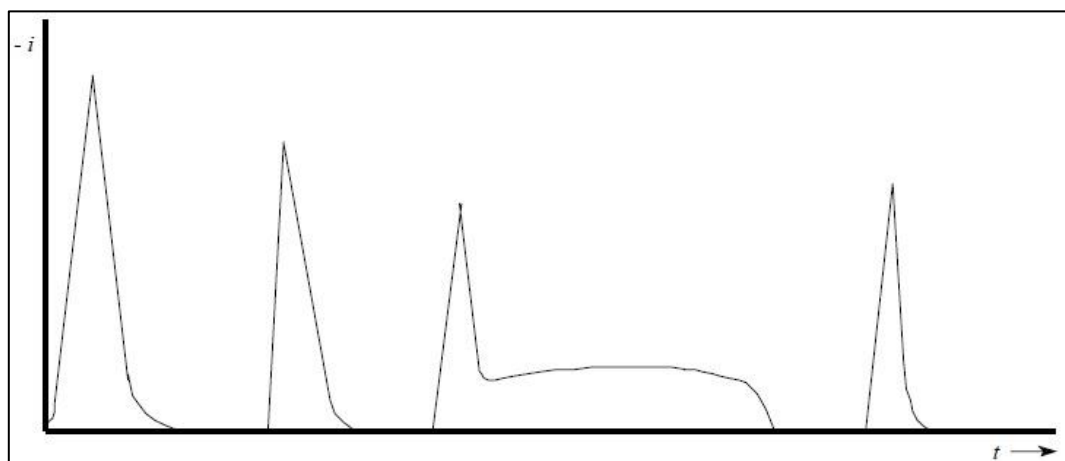


Figura 2.26. Perfil típico rayo negativo nube-tierra [12]

En la figura [2.26] se presenta el perfil típico de este tipo de rayo, presentándose el primer impacto de retorno de gran corriente de impulso de una corta duración el valor de la corriente puede alcanzar los 100 kA, siguiendo a este se pueden presentar impactos de retorno subsiguientes y corrientes continuas, típicamente los impactos subsiguientes son de un peak eléctrico bajo y de menor duración, un rayo negativo de nube-tierra puede ser formado por varios casos de combinación de estos sucesos.

- Rayos positivos tierra-nube:

Son descargas ascendentes con un origen en la superficie terrestre de carga positiva, aunque se han presentado rayos de este tipo su ocurrencia es de carácter excepcional.

- Rayos negativos tierra-nube:

Son descargas ascendentes causadas por la elevación del campo eléctrico en la superficie de la tierra generalmente no ocurre tal fenómeno pero en las superficies de mayor altura como montañas, torres, edificios, etc. el campo eléctrico puede presentar una intensidad de tal magnitud que podría iniciar una guía ascendente hacia la tormenta.

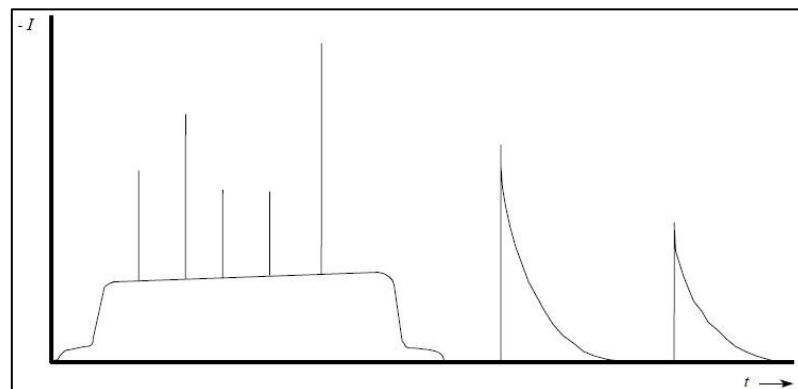


Figura 2.27. Perfil típico rayo negativo tierra-nube [12]

La figura [2.27] muestra que el rayo comienza con una etapa de corriente continua en esta hay corrientes que se pueden superponer, y esta etapa de corriente continua es subseguida de impactos de retorno bastante similares a los presentados en el rayo nube a tierra (figura 2.26). Un rayo de origen ascendente puede estar formado por la combinación de estos casos.

La ubicación donde un impacto de rayo ascendente se adhiere a una estructura es la misma donde se forma el conductor ascendente.

2.3.3.- Protección Contra el Impacto de Rayo en Aerogeneradores.

La formación del fenómeno conocido como rayo en su totalidad no es conocido completamente, el proceso que crea una célula de tormenta no ha sido definido completamente, solamente se cuenta con hipótesis al respecto de la formación del rayo de entre las cuales las más destacadas son: “inducción electrostática” y “mecanismo de polarización”.

La ciencia que se encarga del estudio de los rayos es la meteorología, los rayos son cuantificados mediante el nivel isoceráunico que se define como el número promedio de días al año en el cual se presentan tormentas, considerándose día de tormenta en el cual al menos se oye el trueno. En base al nivel isoceráunico se construyen los mapas isoceráounicos o cartas isoceráunicas, los cuales son mapas geográficos que representan una zona o país para determinar el nivel de riesgo de rayos.

El nivel de riesgo de rayos, se encuentra representado en el mapa ceráunico, por las líneas isoceráunicas, las cuales determinan geográficamente las zonas de más o menos riesgo de actividad de rayos asignándole un cierto valor a cada línea dependiendo de la aparición de días de tormentas por kilómetro cuadrado y por año, donde al menos aparece un solo rayo.

Los aerogeneradores presentan problemas con respecto a los rayos que normalmente no se presentan en otro tipo de estructura, cuyas implicaciones vienen originadas desde los siguientes puntos

- Aerogeneradores de gran altura.
- Ubicación de los aerogeneradores en zonas de alta incidencia de rayos.
- Material de construcción de aerogeneradores incapaces de soportar el impacto de un rayo.

- Palas y góndola giratorias.
- Conducción de la corriente de rayo a través de los componentes internos del aerogenerador.
- Interconexión de los aerogeneradores en un parque eólico.

La influencia de la altura de una estructura en cuanto a la adherencia de rayos a ésta, es la característica de mayor influencia en el número de impactos de rayo que la afectan, también las características del terreno en el cual se ubica el aerogenerador son de suma importancia pues al ser ubicadas en terrenos con características montañosas implica estar en condiciones de suelo de baja conductividad.

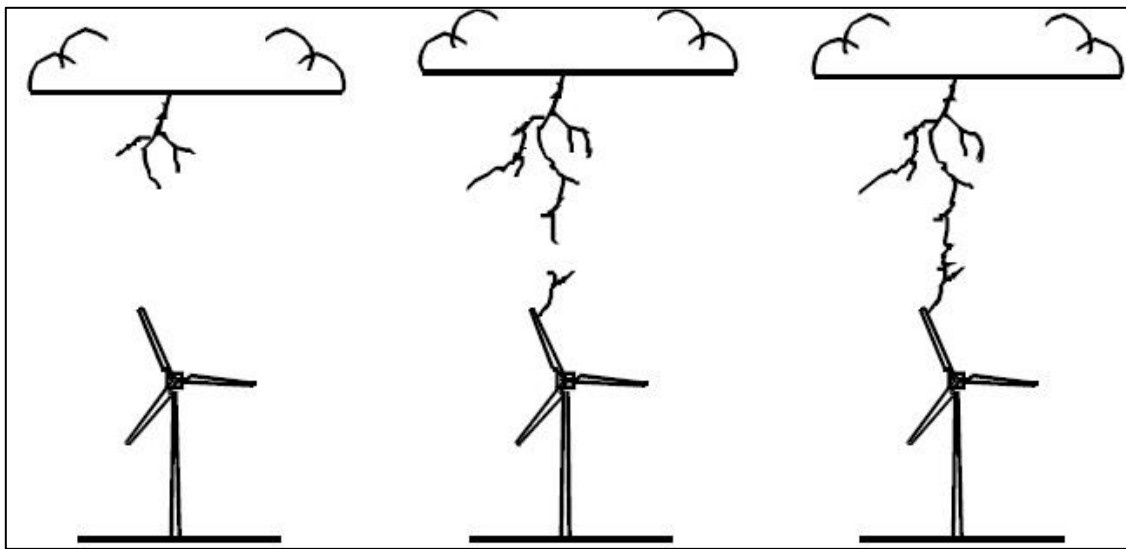


Figura 2.28. Formación impacto de rayo en un aerogenerador [12]

Al ser los aerogeneradores máquinas rotatorias y de una considerable altura existe el riesgo de que el impacto de rayo se adhiera a más de una pala esto se debe a que los rayos están formados mayoritariamente por varios pulsos de retorno de corriente los cuales se forman en periodos de tiempo muy pequeños, entonces al estar girando las palas cambian de ubicación continuamente por esto más de una pala puede ser alcanzada por un pulso de retorno de corriente.

2.3.3.1.- Frecuencia de Impacto de Rayo en un Aerogenerador.

Gracias a los datos que entregan los niveles cerámico de una zona determinada es posible estimar la frecuencia con la cual un rayo impacta un aerogenerador en una zona determinada. La influencia de un impacto de rayo en un aerogenerador no es solo en el aerogenerador en si sino que llega a tomar una cierta área circundante a la estructura del generador eólico.

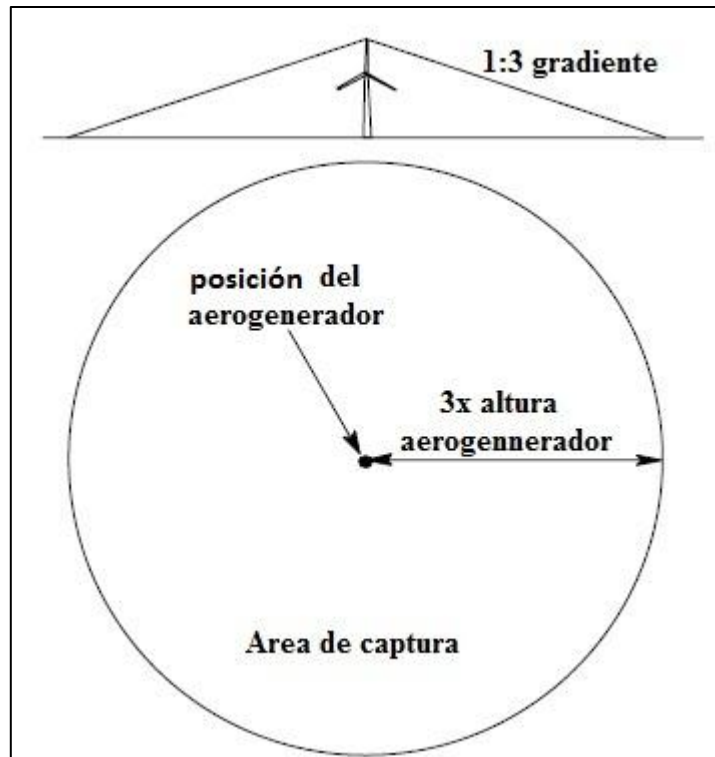


Figura 2.29. Área de captura de impactos de rayos [12]

Para evaluar la frecuencia de impacto de rayo además se requiere la densidad de impacto de rayo en el punto determinado (N_g) [10, 12, 13].

$$N_g \approx 0,1 * T_d \quad (2.19)$$

Donde:

N_g = Densidad de rayo en el suelo promedio anual por km^2 .

T_d = Cantidad de días de tronadura por año.

La frecuencia de impacto de rayo se puede visualizar mediante los mapas de nivel isocerámico, los cuales presentan el promedio de número de impactos de rayo por zona, estos a su vez pueden ser de forma diaria, mensual, estacionaria o anual [21].

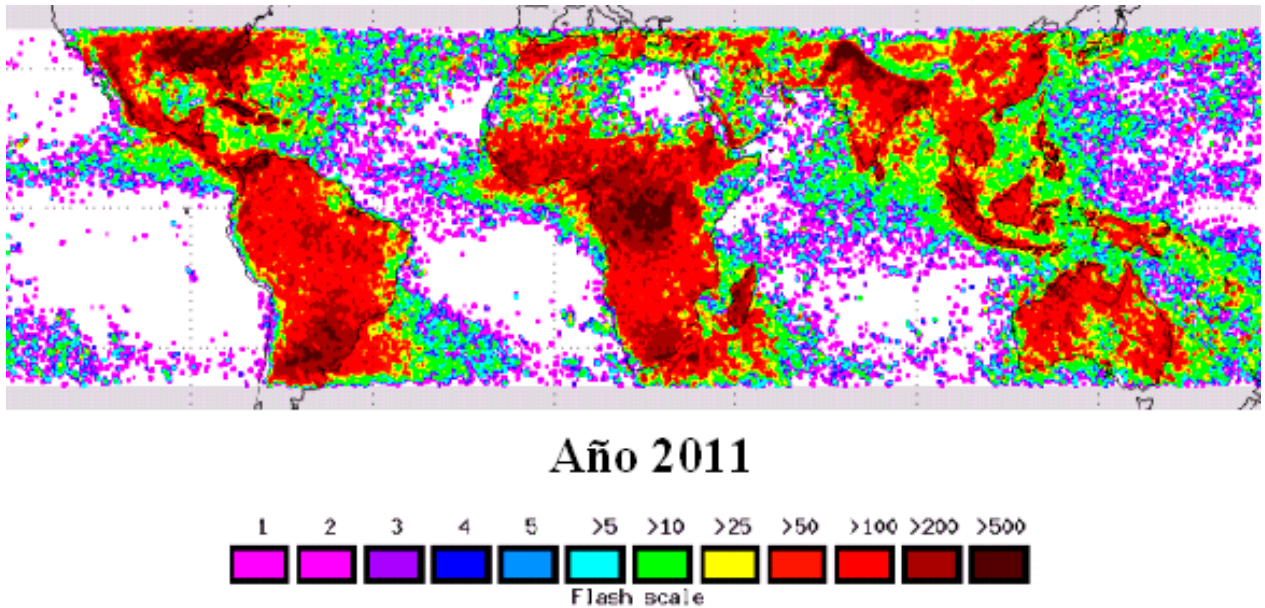


Figura 2.30. Frecuencia de impactos de rayo (anual) [21]

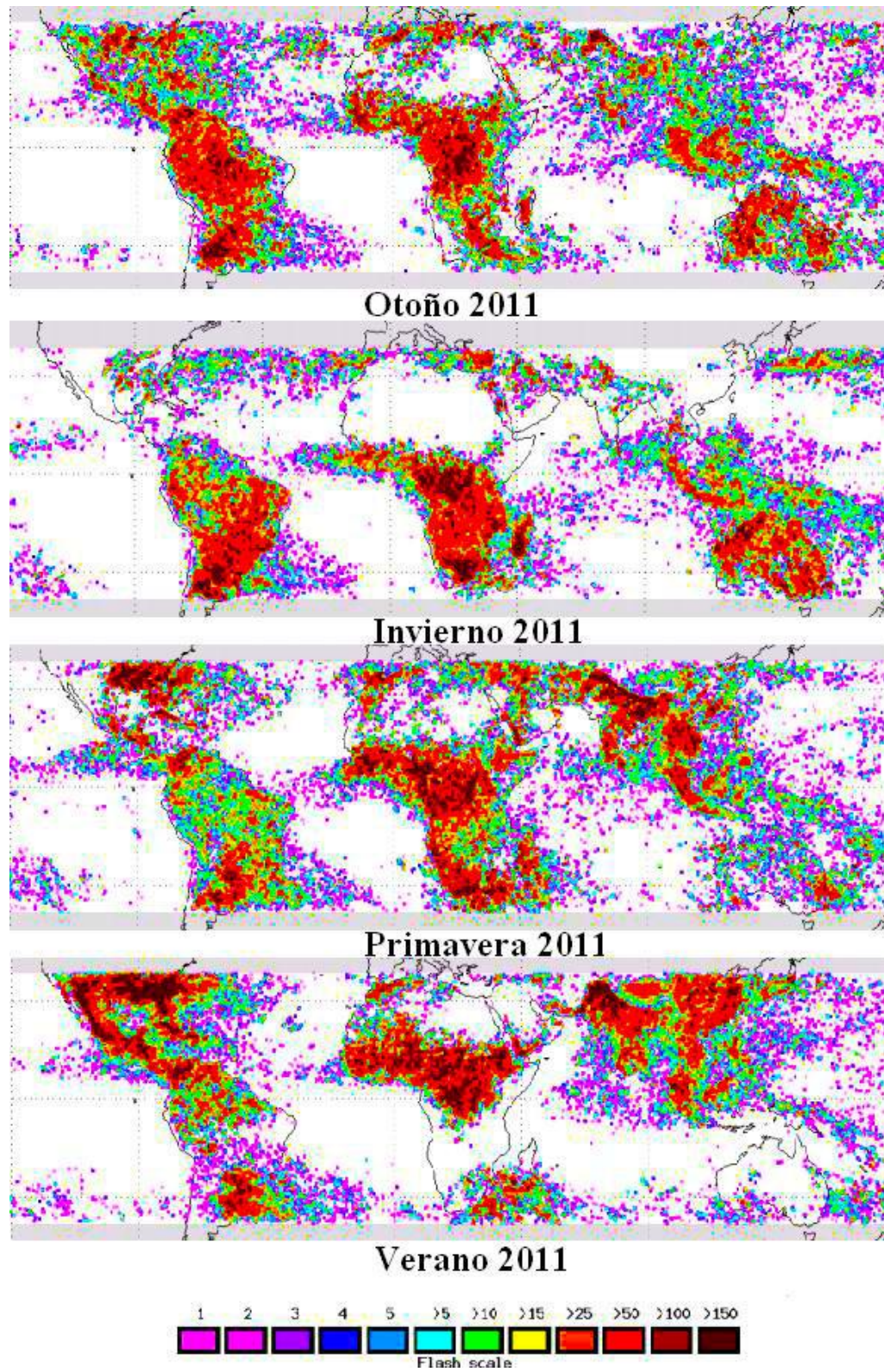


Figura 2.31. Frecuencia de impactos de rayos (estacionario) [21]

Por lo tanto, la frecuencia de impacto de rayo se puede obtener mediante la siguiente ecuación [11, 12]:

$$N_d = N_g * A_d * C_d * 10^{-6} \quad (2.20)$$

Donde:

N_d = Número anual promedio de impacto de rayo directos.

N_g = Densidad de rayo en el suelo promedio anual por km^2 .

A_d = Área de captura equivalente, figura [2.33].

C_d = Fact. Ambiental, $C_d = 1$ terreno plano, $C_d = 2$ terreno elevado.

La ecuación (2.20) se puede escribir en relación a la altura efectiva de un aerogenerador en un terreno plano de la siguiente forma [11, 12]:

$$N_d = N_g * 9 * \pi * h^2 * 10^{-6} \quad (2.21)$$

Donde:

h = Altura efectiva del aerogenerador en mts

En aerogeneradores localizados en lugares de una notablemente alta incidencia de rayos se debe asignar un valor de factor ambiental (C_d) alto, en los aerogeneradores costeros se utiliza un valor de C_d de 3 a 5 con el fin de obtener un valor realista de la frecuencia de adherencia de los rayos.

2.3.3.2.- Niveles de Protección del Aerogeneradores Contra el Rayo.

Los niveles de protección contra rayo permiten seleccionar un sistema de protección contra rayo adecuado a un sistema dado, a base de la frecuencia de impactos de rayos en una estructura, estos niveles varían conforme a los eventos críticos presentados, estos a su vez varían

dependiendo de la exposición de riesgo de las personas o puede ser estimado por el propietario de acuerdo a el valor económico que le asigne al sistema de generación eólica, así un aerogenerador de alta potencia presenta una gran incidencia al riesgo humano debido a la cantidad de personas que pueden trabajar en él y con ello se presenta un alto riesgo a la vida humana, en cambio un sistema de generación eólica aislada no se encuentra comúnmente personas trabajando en el salvo en las inspecciones rutinarias y la mantención, pero si incide el valor económico pues muchas veces este es el único sistema de generación de energía para una localidad dada.

El número anual de eventos críticos permitidos se puede estimar de la siguiente forma [11]:

$$N_c \geq N_d * (1 - E) \quad (2.22)$$

Donde:

N_c = Número anual de eventos críticos permitidos.

N_d = Número anual promedio de impacto de rayo directos.

E = Eficiencia del sistema de protección contra rayos.

Reescribiendo la ecuación se muestra que la eficiencia mínima del sistema de protección es el producto de dos tipos de eficiencias, la eficiencia de intercepción del rayo y la eficiencia de distribución del rayo a tierra. La eficiencia mínima se puede calcular mediante las siguientes relaciones [12]:

$$E \geq 1 - \left(\frac{N_c}{N_d} \right) \quad \text{ó} \quad E \geq 1 - \left(\frac{R_a}{R_d} \right) \quad (2.23)$$

Donde:

R_a = Riesgo de daño.

R_d = Riesgo de tolerancia del daño.

Los niveles de protección contra el impacto de rayo son normados por la IEC mediante la norma IEC 62305 “Protection Against Lightning”

Tabla 2.6. Niveles de protección contra rayos [12]

Niveles del sistema de protección	Eficiencia de intercepción E_i	Eficiencia de distribución E_s	Eficiencia $E = E_i * E_s$
I	0,99	0,99	0,98
II	0,97	0,98	0,95
III	0,91	0,97	0,9
IV	0,84	0,97	0,8

Físicamente conductores más grandes evacuan de manera más segura la energía producida por un rayo pero esto indica un costo de mayor valor en el sistema de protección, por esto se cuenta con una normalización de los niveles de energía para así elegir el nivel de protección que mejor se adecue al sistema que se pretende implementar.

Tabla 2.7. Valores máximos de los parámetros de la protección contra rayos [12]

Nivel de protección	Corriente peak kA	Energía específica	Tasa promedio subida corriente	Transferencia de carga eléctrica total
I	200	10000	200	300
II	150	5600	150	225
III	100	2500	100	150
IV	-	-	-	-

En la tabla [2.7] se da a entender, como ejemplo que una protección de nivel I debería tolerar una corriente de peak de 200 kA, y demás datos energéticos, esto desprende los datos para

elegir correctamente el nivel de protección y las dimensiones de los conductores a utilizarse en las protecciones contra el impacto de rayo.

2.3.3.3.- Zonas de Protección de Aerogeneradores Contra el Rayo.

Un aerogenerador se puede subdividir en áreas (LPZ) las cuales definen la influencia de un impacto de rayo en dicha área, el fin de estas áreas es asegurar la protección contra rayo dependiendo de la importancia de cada área, que depende de los componentes eléctricos que se encuentren en ésta.

Las zonas están divididas de acuerdo a la probabilidad de adherencia de un impacto directo de rayo y la magnitud de la corriente en dicha zona además del campo electromagnético estimado que se produce con el impacto de rayo en ésta. Por lo tanto el sistema de protección contra rayos define las zonas de protección a partir del apantallamiento de cables, pantallas magnéticas, y dispositivos de supresión de sobretensiones determinan las zonas de protección contra el rayo. En consecuencia directa a la amenaza de rayo, se definen las siguientes zonas de protección:

-LPZ 0_a: Zonas expuestas al impacto directo del rayo, los sistemas internos pueden estar sometidos a la totalidad de la corriente del rayo o a una parte de esta.

-LPZ 0_b: Zonas protegidas del impacto directo del rayo pero el riesgo está dado por la influencia del campo electromagnético generado, los sistemas internos pueden estar sometidos a corrientes parciales del rayo.

-LPZ 1: Zona sin adherencia del impacto directo de rayo, en la cual el impulso de corriente está limitado por la distribución de las corrientes y por los dispositivos de sobretensión, con un apantallamiento especial para atenuar el campo electromagnético.

-LPZ 2: Zona sin adherencia del impacto directo del rayo, el impulso de corriente y el campo electromagnético son más atenuados a partir de la atenuación presentada en la zona de protección LPZ 1.

La zona 0 es esencialmente la parte externa del aerogenerador donde se presenta la incidencia de un impacto de rayo, esta zona es subdividida entre la 0_a y la 0_b esta subdivisión se determina mediante un modelo de esferas, al presentarse las aspas como la parte más alta del aerogenerador esta presentan la mayor cantidad de impactos de rayos y además en la góndola comúnmente se encuentran varillas contra rayos, por lo tanto éstas son zonas del tipo 0_a mas en la parte inferior del aerogenerador el impacto de un rayo es poco probable pero la corriente del rayo al ser evacuada hacia la malla a tierra pasa por dicha zona en consecuencia se presenta una zona del tipo 0_b la figura [2.32] muestra en detalle las zonas de protección en un aerogenerador genérico.

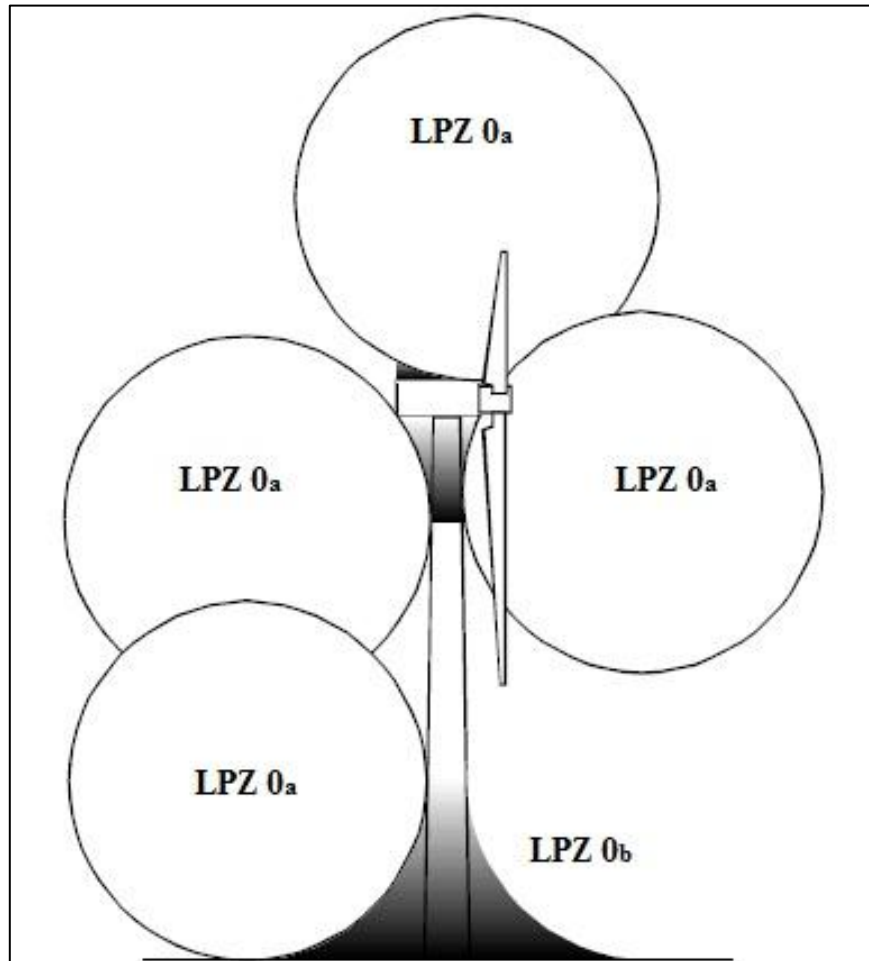


Figura 2.32. Zonas de protección, modelo de esferas rodantes. [12]

Las zonas 1 y 2 son básicamente las áreas internas del generador en las cuales no se puede presentar un impacto directo de un rayo pero las corrientes y campos electromagnéticos si, la figura [2.33] muestra estas zonas en un aerogenerador genérico

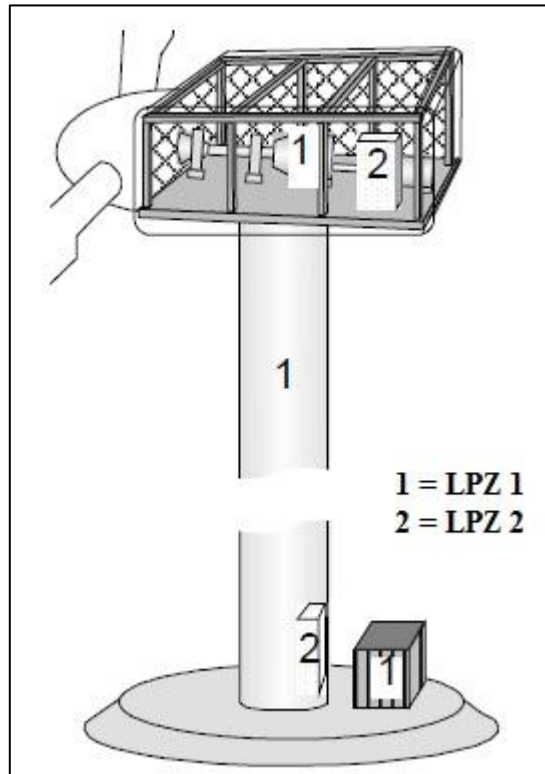


Figura 2.33. División interior de un aerogenerador en zonas de protección [12]

Con el fin de evitar la falla se debe asegurar que dentro de una zona de protección dada ningún componente eléctrico esté expuesto a las corrientes de rayos, diferencias de voltaje o campos electromagnéticos, sobre sus niveles de tolerancia.

2.3.4.- Sistema Protección Contra el Impacto de Rayo.

El diseño de un sistema de protección contra rayo (SPR), depende de la técnica de construcción y es congruente a la evaluación económica del sistema a proteger, además presenta

una gran importancia si las etapas de diseño y construcción del SPR están coordinadas con las etapas de diseño y construcción de la estructura a proteger, es común que un SPR utilice la propia estructura, las partes metálicas como partes de sí mismo.

En estructuras existentes, el diseño de la clase y la localización del SPR deben tener en cuenta las limitaciones correspondientes a la situación existente.

Los SPR se encuentran divididos en clases concordes a los niveles de protección de estructuras.

Tabla 2.8. Equivalencia entre NPR y SPR [13]

Niveles de protección contra rayo	Clases sistema de protección contra rayo
I	I
II	II
III	III
IV	IV

Las clases de SPR se definen por lo siguiente:

- Datos que dependen de la clase del SPR:

Estos son los parámetros del rayo, radio de la esfera rodante, distancias normales entre los conductores de bajada y entre los anillos conductores, distancia de separación para evitar la formación de chispas peligrosas, malla a tierra.

- Datos que no dependen de la clase del SPR:

Como las conexiones equipotenciales, espesores mínimos de las chapas o de las tuberías metálicas en los sistemas de bajada, materiales y condiciones de empleo de los SPR, configuraciones y dimensiones mínimas de los captadores, conductores de bajada y tomas de tierra.

Los SPR se encuentran formados comúnmente por un sistema de protecciones interno SPRI y un sistema de protecciones externo SPRE.

2.3.4.1.- Sistema de Protección Externo Contra el Rayo.

Un SPRE son principalmente los aparatos encargados de interceptar el rayo tanto los impactos directos como las descargas laterales y transportar las corrientes del rayo de manera segura hacia la malla a tierra y ser dispersadas en la misma sin que se produzcan daños en la estructura a proteger, es común la utilización de las partes metálicas de la estructura que se protege.

El SPRE consta de un sistema de captura del rayo que pretende disminuir la posibilidad de penetración del rayo en la estructura a proteger, estos se encuentran formados por la combinación de los siguientes elementos:

- varillas (incluidos mástiles separados)
- cables de catenaria;
- conductores mallados.

En aerogeneradores las palas son el punto común de los impactos de rayos estas constan de receptores metálicos formados por aleaciones, las cuales presentan una gran conductividad además de gran resistencia al impacto del rayo.

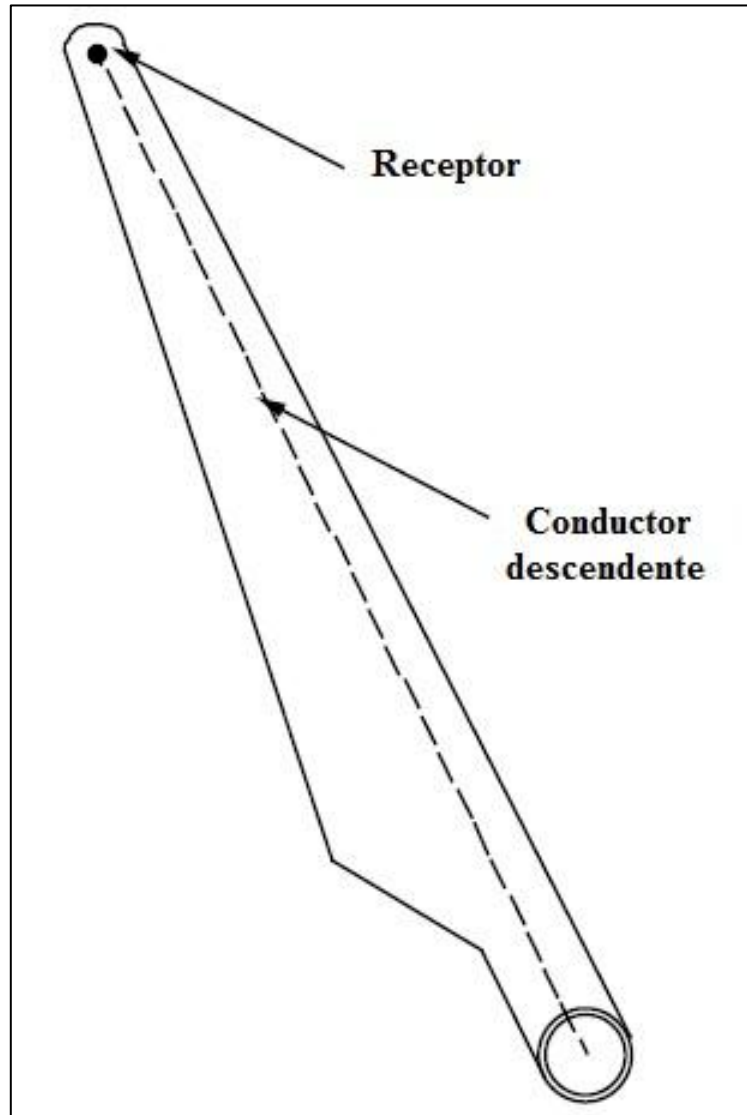


Figura 2.34. Sistemas de intercepción de rayos en palas del aerogenerador [13]

Dependiendo del tipo de aerogenerador existen métodos de protección dependiendo del tamaño y potencia de este.

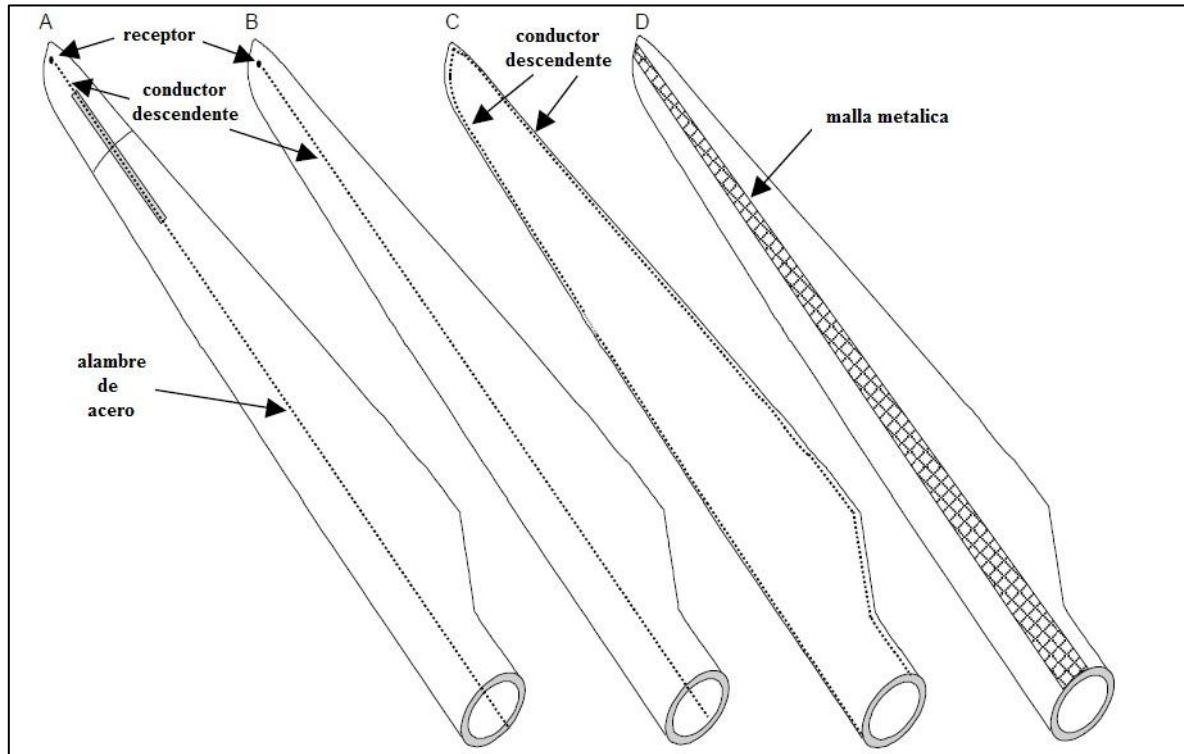


Figura 2.35. Sistemas de intercepción y conducción de rayos dependiendo del tipo de pala [13]

En la figura [2.35] se muestran distintos tipos de sistemas de intercepción y conducción de la energía del rayo, los cuales presentan métodos de intercepción alojados en la superficie de la pala como incrustaciones metálicas en ésta. Los sistemas A y B son utilizados comúnmente para palas de una longitud máxima de 20 mts y los sistemas C y D son utilizados para palas de mayor envergadura.

Con el fin de reducir al máximo la probabilidad de daños que se presenten en la estructura debidos a la corriente del rayo que circula por el SPRE, se deben presentar varios conductores de bajada paralelos y la longitud de estos debe ser la mínima posible. Los materiales comúnmente utilizados en las terminaciones aéreas y conductores de bajada son el cobre, aluminio y acero, las secciones mínimas de estos conductores se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 2.9. Sección mínima de materiales para sistemas de protección contra rayos [13]

Material	Conexión aérea mm ²	Conductor descendente mm ²
cobre	35	16
aluminio	70	25
acero	50	50

En la base de la pala se utiliza como continuidad del sistema de bajada de la energía del rayo un contacto deslizante o un cable de conexión flexible.

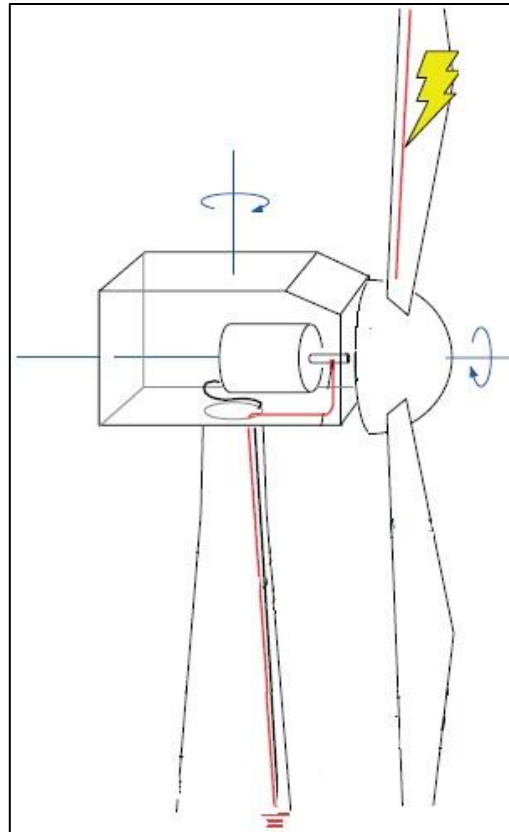


Figura 2.36. Recorrido de la corriente producida por un impacto de rayo en un aerogenerador [13]

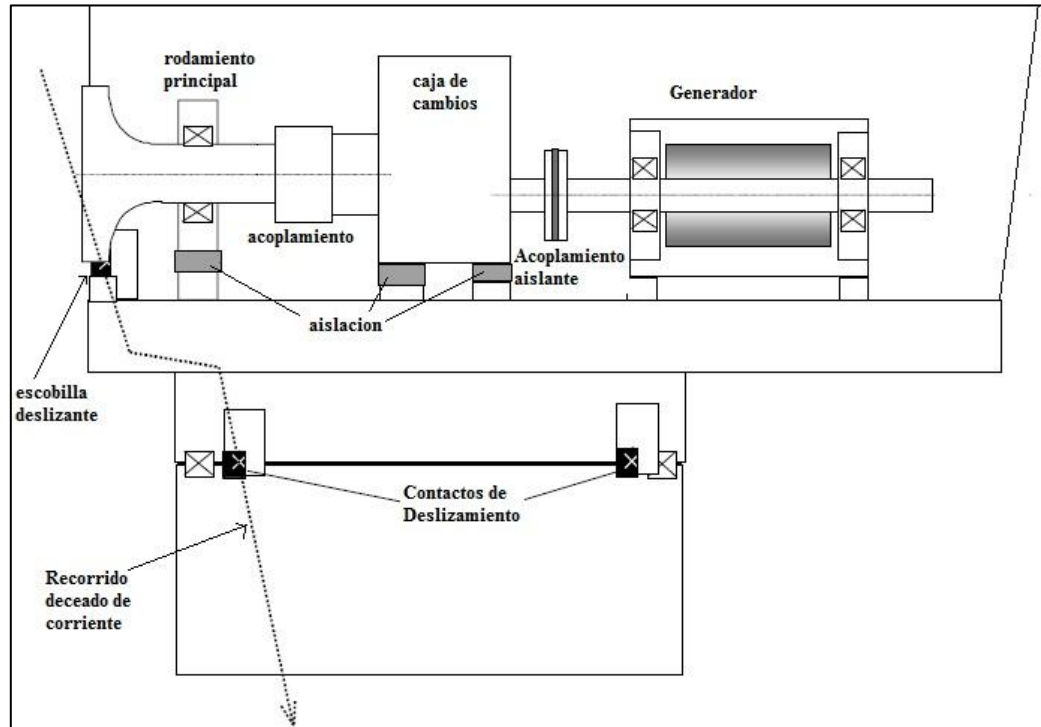


Figura 2.37. Contactos de paso de corriente del rayo en la rotación del eje como en la rotación de la góndola [13]

El rayo que impacta en la pala es transmitido por el conductor interno de la pala y pasa por la góndola a través de escobillas rozantes y luego baja por conductores hacia la malla a tierra para su dispersión.

Los conductores de bajada deben disponerse de tal manera que desde el punto de impacto a tierra:

- Existan varios caminos en paralelo para la corriente.
- La longitud de los caminos de corriente se reduzca al mínimo.

Los conductores de bajada no deben instalarse en canalones o en tuberías de drenaje, incluso si se encuentran cubiertos con material aislante y deben seguir el camino más recto posible hacia la malla a tierra

2.3.4.2.- Sistema de Protección Interno Contra el Rayo.

La finalidad del SPR interno es proteger e impedir que se produzcan chispas en la estructura a proteger y en cualquier parte de la estructura que pueda circular corriente producida por el impacto de un rayo.

Este chisporroteo puede prevenirse mediante conexiones equipotenciales o el simple aislamiento eléctrico de las partes, la peligrosidad de estas chispas es incrementada cuando en las estructuras a proteger existe el riesgo de explosión, como en la combinación de sistemas ya sea en un sistema diesel más un sistema eólico aquí el riesgo de chispas cerca del estanque de combustible sugiere una mayor eficiencia en el SPR interno con el fin de salvaguardar este estanque del contacto con las chispas producidas por el impacto de rayo y con eso tener un sistema energético robusto.

Las conexiones equipotenciales en el SPRI se obtienen conectando el SPR con las partes metálicas de la estructura, instalaciones metálicas, sistemas internos, partes conductoras internas y las líneas conectadas a la estructura. Al conectar los sistemas internos al SPR se debe tener en cuenta el efecto de la circulación de la corriente de rayo por el sistema conectado, se deben tomar las medidas referentes a que parte conectar al SPR y que parte no.

En la interconexión es recomendable el uso de dispositivos de protección contra sobretensiones equipotenciales; esto es, cuando no es posible realizar conexión directa con los conductores.

Tabla 2.10. Dimensiones mínimas de los conductores que conectan las diferentes barras equipotenciales con el sistema de puesta a tierra [12]

Clase de SPR	Material	Sección en mm ²
I a IV	Cobre	14
	Aluminio	22
	Acero	50

Tabla 2.11. Dimensiones mínimas de los conductores que conectan las instalaciones metálicas internas a las barras equipotenciales en las partes externas del SPR [12]

Clase de SPR	Material	Sección en mm2
I a IV	Cobre	5
	aluminio	8
	Acero	16

Es común la utilización de material aislante en cañerías de agua o gas, estas piezas deben estar resguardadas por DSP, (dispositivos supresores de potencial), los cuales son configurados de la siguiente forma [11].

$$I_{imp} \geq K_{ib}I \quad (2.24)$$

Donde:

I_{imp} = Corriente de impacto del rayo.

$K_{ib}I$ = Corriente del rayo circulante por parte correspondiente del SPRE.

K_{ib} = Coeficiente de reparto de corriente entre los conductores de bajada.

En las partes conductoras en el exterior de la estructura a proteger las conexiones equipotenciales deben ser puestas lo más cerca posible del punto de entrada a ella.

Si los conductores del sistema eléctrico interno de la estructura son apantallados o se encuentran en conductos metálicos, la conexión equipotencial de estos debe ser suficiente para el resguardo contra la circulación de corriente de rayo.

Las líneas eléctricas y de telecomunicaciones que lleguen a la estructura deben resguardarse mediante DSP.

2.3.4.3.- Diseño del SPR

Es posible un diseño optimizado, técnica y económicamente, de un SPR, especialmente si las etapas de diseño y construcción del SPR están coordinadas con las etapas de diseño y construcción de la estructura a proteger.

En estructuras existentes, el diseño de la clase y la localización del SPR deben tener en cuenta las limitaciones correspondientes a la situación existente y la valorización económica tanto de la utilidad de la estructura a proteger como el valor de esta en sí.

Todo esto queda sujeto al interés por proteger el sistema, esto es debido a la importancia de la producción de esta estructura y los costos que producen la reparación en cuanto a pérdidas por salida de servicio y los costos de materiales de la reparación.

En particular, el diseño de la propia estructura debería emplear las partes metálicas de la estructura como partes del SPR.

2.4.- Conexión a Tierra.

2.4.1.- Introducción.

En cualquier tipo de sistema eléctrico es necesaria una conexión a tierra con el propósito de salvaguardar tanto la vida, como lo material.

Una conexión a tierra eficiente es necesaria para la buena distribución en tierra de las corrientes generadas por el impacto de rayo, y así poder evitar daños al aerogenerador y con ello alargar la vida útil del sistema energético, el sistema de puesta a tierra debe dispersar y conducir la alta frecuencia y la alta energía de la corriente del rayo en la tierra sin cualquier efecto termal y/o electrodinámico peligroso.

En un sistema eólico la puesta a tierra es fundamental en el propósito de proteger el aerogenerador ante cualquier impacto de rayo y contra cualquier falla eléctrica del sistema, es recomendable el acople a la malla tierra de las partes metálicas de la fundición con el fin de obtener la impedancia más baja posible. En el caso de los aerogeneradores cada uno de estos

debe contar con su sistema propio de conexión a tierra incluso cuando ellos se encuentran en parques eólicos de varios generadores en cuyo caso es usual la interconexión de todas las mallas a tierra. El propósito de ésta es proveer de una unión equipotencial contra los efectos de los rayos y evitar tensiones transferidas entre electrodos o sistemas de tierra, obtener una respuesta más rápida de los equipos de protección, obtener una red de tierra más segura y confiable, lograr una red más extensa y con un mayor número de electrodos.

2.4.2.- Aspectos Básicos del Diseño de Malla a Tierra.

El diseño básico de una malla a tierra para un aerogenerador debe salvaguardar tanto a las personas que operan el sistema como a las personas y animales que se encuentren cercanos a éste. Tanto para las descargas energéticas producidas por una falla eléctrica del propio sistema, como para una descarga de origen atmosférico.

Esto a su vez presenta una alteración en cuanto a los aspectos de una malla eléctrica común pues se deben considerar las variables vinculadas específicamente con la descarga atmosférica, lo cual lleva a tomar en cuenta aspectos de la malla a tierra que no son considerados habitualmente.

Esto tiene que ver con la condición dinámica de un impacto de rayo, típicamente un sistema de puesta a tierra (SPT), se diseña considerando corrientes de baja frecuencia y en estado de régimen permanente, en cambio la corriente del rayo presenta un espectro de onda de baja y alta frecuencia lo cual origina acoplamientos inductivos-capacitivos, lo cual determina el comportamiento de la red en régimen transitorio, derivando en una menor influencia de la variable resistiva.

El parámetro que muestra el comportamiento de una malla a tierra para la correcta dispersión de un impacto de rayo la “*Impedancia de Impulso*” (se define la razón entre los valores máximos de la tensión y de la corriente ante un impulso, en un punto del electrodo de tierra” (Germán Moreno, 2007), para la aplicación en aerogeneradores se definirá la impedancia de impulso como la relación del valor pico de voltaje desarrollado en el punto de impacto del rayo y el pico de corriente inyectada en ese punto, esta depende del tamaño y forma de la red además del espaciamiento entre electrodos la forma y magnitud de la onda de corriente y las características resistivas del suelo.

En el diseño de un SPT habitualmente se considera cuatro aspectos fundamentales

1. Protección de la seguridad personal en cuanto al voltaje de paso y de malla que aparecen durante fallas a tierra.
2. Protección de los equipos contra el daño significativo.
3. Resistencia durante el tiempo de la falla a las fuerzas termales y electrodinámicas a las cuales será expuesta durante esta.
4. Durabilidad a el factor tiempo y uso.

2.4.3.- Electrodo a Tierra.

El electrodo a tierra es la parte principal de la malla a tierra. Es el encargado de dispersar tanto las corrientes de falla como las producidas por el impacto de rayo, según la norma internacional de la IEC 62305-3, para electrodos a tierra en aerogeneradores es usualmente utilizado uno de los dos tipo que se especifican a continuación.

2.4.3.1.- Electrodo en Disposición Tipo A.

Corresponde a instalación de electrodos verticales u horizontales conectados a cada conductor descendente, en el caso de un aerogenerador, el conductor descendente puede ser la torre del mismo aerogenerador, este tipo de electrodo de tierra no es muy recomendado para aerogeneradores sino más bien para proteger por ejemplo edificios que contienen equipo de medida o cobertizos de oficina que no están relacionados con un parque eólico. Se debe considerar que en este tipo de conexión a tierra el número de electrodos nunca debe ser inferior a dos.

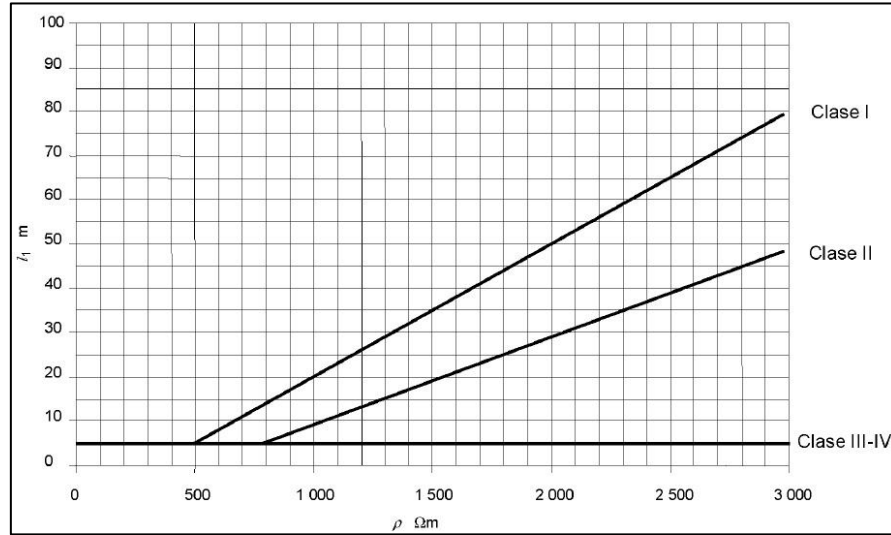


Figura 2.38. Largo de electrodo (l_1) tipo A, en función de clase del SPR. [11]

Dependiendo de la posición de los electrodos, ya sea horizontal o vertical es el largo mínimo de estos [11, 12].

l_1 = Electrodos en disposición vertical.

$0,5l_1$ = Electrodos en disposición horizontal.

En el caso que la malla a tierra presente combinación de disposición de electrodos (verticales u horizontales), debe considerarse la longitud total de éstos.

2.4.3.2.- Electrodo en Disposición Tipo B.

Corresponde a la instalación de un electrodo a tierra en forma de anillo externo a la estructura en contacto con el suelo. Se pueden usar electrodos horizontales o verticales adicionales en combinación al electrodo en anillo. Cuando este es insuficiente para lograr la impedancia requerida, el electrodo deberá estar por lo menos a una profundidad de 0,5 m. Siempre los electrodos deben estar relacionados con la fundición de la estructura.

Para este electrodo tipo anillo se debe considerar que el largo medio de su radio r_m , no debe ser menor al largo de un electrodo si se utilizara el electrodo del tipo A [11, 12].

$$r_m \geq \ell_1 \quad (2.25)$$

Donde:

r_m = Radio medio electrodo tipo anillo, (tipo B).

ℓ_1 = Largo del electrodo en función a la clase de SPR, (tipo A).

Cuando se requiere mejorar la malla debido a que el largo ℓ_1 debe ser mayor al establecido por r_m , se debe agregar a la malla electrodos en forma horizontal ℓ_h o electrodos de forma vertical ℓ_v para poder lograr los niveles de impedancia más bajos posibles con ello proveer de una conexión segura a tierra, siendo [11, 12]:

$$\ell_h = (\ell_1 - r_m) \quad (2.26)$$

$$\ell_v = \frac{(\ell_1 - r_m)}{2} \quad (2.27)$$

Donde:

ℓ_h = Electrodos adicionales en disposición horizontal.

ℓ_v = Electrodos adicionales en disposición vertical.

r_m = Radio medio electrodo tipo anillo.

ℓ_1 = Largo del electrodo en función a la clase de SPR.

Se debe tener en cuenta que la cantidad de electrodos no debe ser menor a la cantidad de

conductores de bajada, además en el tipo B, los electrodos adicionales que podrían conectarse deben ser dispuestos en lo posible en forma equidistante y en la posición de la conexión de los conductores de bajada.

La profundidad de la malla a tierra es referente al tipo de malla tomando en cuenta que para mallas del tipo A la profundidad a la cual se entierran los electrodos no debe ser inferior a los 0,5 m y en la mejor distribución posible, en cambio los electrodos del tipo B deben ser posicionados a no más allá de 1 metro de la fundición y a una profundidad mínima de 0,5 m.

En la construcción de la malla a tierra se debe considerar una inspección visual rigurosa del estado de los electrodos haciendo hincapié en minimizar los efectos de la corrosión, en terrenos del tipo rocoso es recomendable la instalación de malla a tierra del tipo B al igual que en zonas donde el peligro de incendios es inminente.

En la construcción de la malla a tierra la equipotencialidad es un aspecto de suma importancia el cual se logra conectando la malla a tierra, a la fundición, partes metálicas estructurales; instalaciones metálicas; sistemas internos; las partes propicias externas y las líneas de servicio se unen con la estructura, existe una estandarización con respecto a los conductores que unen estas partes metálicas con la malla a tierra.

Tabla 2.12. Sección mínima de conductores conectados a partes propicias externas del SPR [11]

Clase SPR	Material	Sección transversal mm ²
I al IV	Cobre	14
	Aluminio	22
	Acero	50

Tabla 2.13. Sección mínima de conductores conectados sistemas internos del SPR [11]

Clase SPR	Material	Sección transversal mm ²
I al IV	Cobre	5
	Aluminio	8
	Acero	16

Las torres eólicas preferentemente construidas a base de metales deben ser consideradas como el conductor primario de la corriente de rayo esto debe ser primordial en el diseño de ésta, además todas las partes que por donde podría circular la corriente de rayo debe ser afianzada a la torre de manera equipotencial, y si estas torres son de hormigón con alma de acero, el enfierrado también debe ser considerado en el sistema contra el impacto de rayos.

2.4.4.- Dimensionando el Electrodo de Tierra.

Las características de dimensionado del electrodo de tierra dependen principalmente del tipo de SPR y de la clase de suelo en el cual se pretende instalar la tierra.

En lo común para suelos con resistividad mayor a los 500 Ωm , la longitud mínima debe ser l_1 y esta aumenta por sobre los 80 m linealmente en suelos que presentan una resistividad mayor a los 3.000 Ωm .

Para la disposición del tipo B el anillo debe estar en la tierra al menos un 80% de este además de una distancia mínima de 1 m de la fundición de la estructura. El largo l_1 sigue los principios mostrados en las ecuaciones de las secciones 2.4.3.1 y 2.4.3.2.

La longitud mínima indicada, l_1 , puede ser desestimada si la resistencia de la malla a tierra del sistema es menor que 10 Ω medidos en una frecuencia diferente de la frecuencia de poder (50 Hz a 60 Hz).

La correcta información sobre la resistencia de suelo, tiempo de falla a tierra, tiene suma

importancia en la planificación del diseño más adecuado a cada caso y la instalación del sistema correcta de un sistema de malla a tierra.