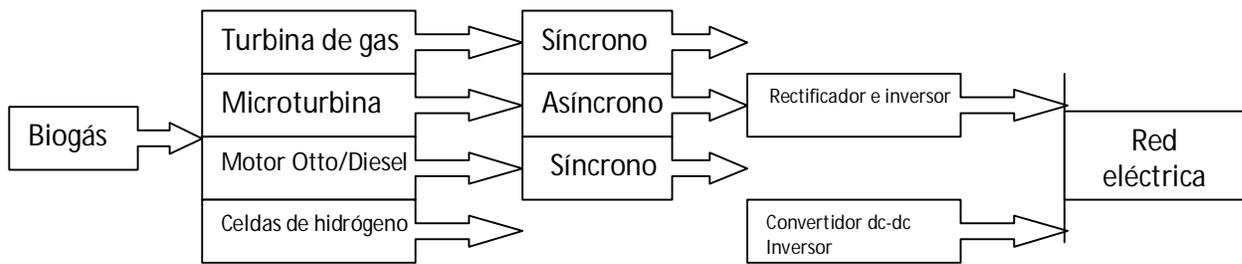


## 5 Generación distribuida.

### 5.1 Definición.

Un sistema de generación distribuida (GD) está compuesto por distintos dispositivos cuyo objetivo común es la generación y almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, es decir, hasta 50 MW; cerca del sitio de consumo, sincronizada y, conectada o no, a la red eléctrica local.

Se puede emplear la generación distribuida para cubrir diferentes momentos de la demanda del usuario: carga base, carga en punta, como generación aislada o remota o como soporte a la red de distribución. Los sistemas de generación distribuida en estudio son básicamente:



Los generadores asíncronos o de inducción son típicamente pequeños, menores a los 500 kVA, pues para estos se requiere de una fuente de potencia reactiva externa (Fig. 5.1a). Éstos generadores pueden suministrar potencia real (W) a la empresa eléctrica pero requieren una fuente de potencia reactiva (var) que normalmente proviene de la misma empresa eléctrica [21].

Los generadores síncronos requieren de un devanado de campo de CD que proporción la fuente de excitación al generador. Éstos generadores representan una fuente de potencia real y una reactiva para la red de distribución (Fig. 5.1b), pero requieren equipo de sincronización para la puesta en paralelo con la red de distribución.

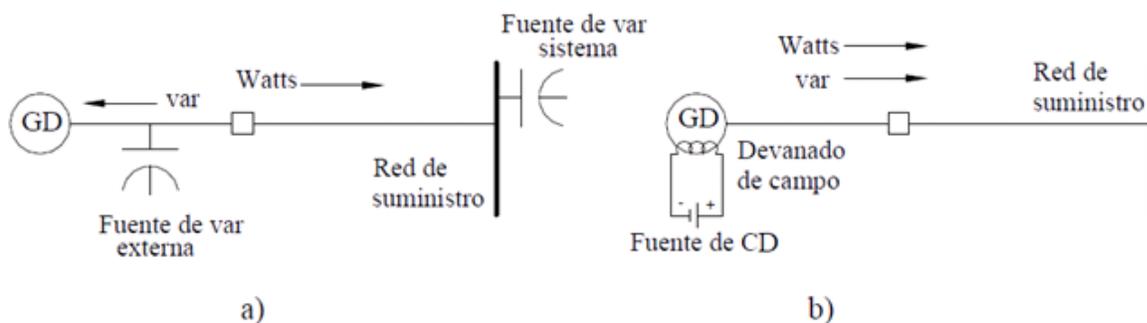


Figura 5.1 Tipos de generadores. a) Generador de inducción o asíncrono. b) Generador Síncrono [21].

## **5.2 Calidad de la energía proveniente de la generación distribuida.**

El producto que reciben los clientes es la onda de tensión. Por lo tanto la calidad depende del cuidado que se tenga sobre sus características:

- Frecuencia.
- Amplitud.
- Forma de onda.
- Simetría del sistema trifásico.

## **5.3 Interconexión de la generación distribuida a la red de distribución.**

Un aspecto necesario en la GD es la interconexión con la red eléctrica, para poder cubrir cualquier eventualidad del sistema de compra o venta de energía eléctrica.

### **5.3.1 Reglas generales de interconexión.**

Las reglas generales de interconexión son los requisitos que se deben cumplir para la interconexión al Sistema Eléctrico Nacional. En estas se especifica la información que se deberá proveer al operador del sistema para la operación, planificación, estadística, predicción de la demanda, mantenimiento, disponibilidad de la generación, etc.

- a) Regulación de la tensión. Se debe mantener una tensión constante a pesar de las variaciones debidas a los cambios en la carga y la posible variabilidad en la producción de biogás.
- b) Integración con la puesta a tierra de la red de distribución. Las unidades de GD deben estar conectadas a tierra para evitar sobretensiones a lo largo de la línea.
- c) Desconexión del sistema ante interrupciones en la red eléctrica distribuida. El equipo de GD no debe suministrar corriente al sistema de distribución durante una falla.
- d) Sincronización del sistema de GD con la red de distribución. La salida de la unidad de generación debe tener la misma tensión, frecuencia y ángulo de fase que la red eléctrica a la que se requiere conectar.
- e) El equipo de GD no debe inyectar armónicos ni corriente continua por encima de los umbrales definidos
- f) Por lo que respecta al factor de potencia, este aspecto debe ser lo más cercano a la unidad.

### **5.3.2 Normas de interconexión.**

Standard IEEE 1547 indica las especificaciones técnicas y los requerimientos para poder realizar la interconexión. En ella se detallan los límites permitidos de tensión y frecuencia, similarmente se especifican los límites de Calidad de Potencia, para perturbaciones tales como inyección de corriente continua, armónicas y flicker. Uno de los temas tratados en detalle es lo referente al funcionamiento “no intencionado en isla”, dejando sin considerar la “operación intencionada en isla”, señalando los tiempos de detección y desconexión de tal

funcionamiento. También se detallan las tolerancias en frecuencia, tensión y fase para las operaciones de sincronización. La norma IEEE 1547-1 detalla el procedimiento a seguir en las pruebas mencionadas en la norma IEEE 1547, para verificar la interconexión de la generación distribuida al sistema de potencia. La IEEE 1547-3, se refiere a los protocolos para el intercambio de información y el control de la operación, entre la generación distribuida y el sistema de potencia.

#### 5.4 Esquemas de protección para la interconexión.

Las fuentes de GD deben operar de forma paralela a la red por lo que se deben modificar los esquemas de protección convencionales. La interconexión se establecerá en el punto de interconexión (PI) entre la fuente de GD y la red de distribución. La interconexión de un GD con la red de potencia en forma directa, es desaconsejable y riesgosa, principalmente en caso de conectarse a líneas aéreas, ya que los generadores poseen nivel de aislamiento diferente con el correspondiente del sistema de potencia. Requiriendo de un transformador de interconexión, cuyas funciones son: adecuar los niveles de tensión, evitar la inyección de corriente continua al sistema, bloquear las armónicas triples, controlar las de corrientes de cortocircuito, facilitar la detección de sobrecorrientes desde el sistema y evitar las sobretensiones por resonancia [22].

Las formas posibles de conectar este transformador son [22]:

- a) Delta del lado del GD y estrella aislada de tierra del lado del sistema.
- b) Delta del lado del GD y estrella puesta a tierra rígida en el otro.
- c) Delta del lado del GD y estrella puesta a tierra no-rígida del lado del sistema.
- d) Delta en ambos lados.
- e) Estrella puesta a tierra del lado del GD y delta del lado del sistema.
- f) Estrella puesta a tierra en ambos lados.
- g) Estrella del lado del GD y estrella puesta a tierra rígida del lado del sistema.

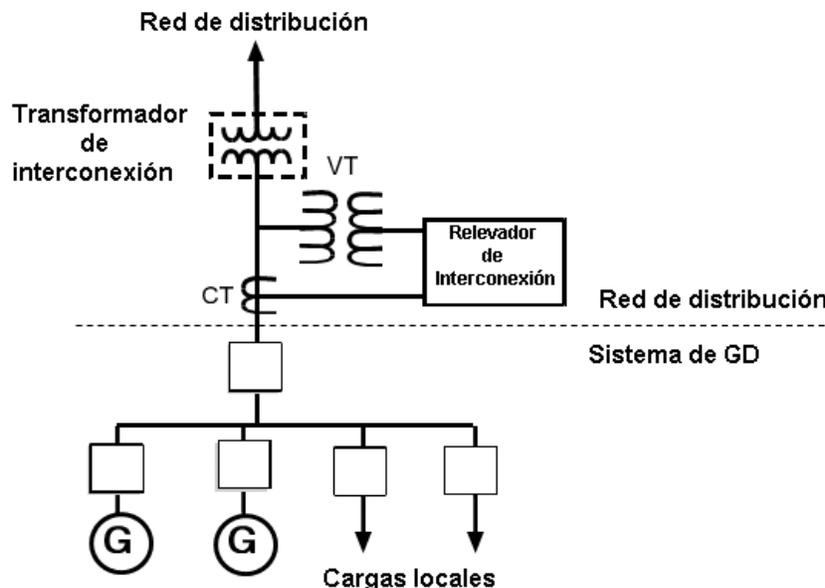


Figura 5.2 Protección típica en la interconexión [23].

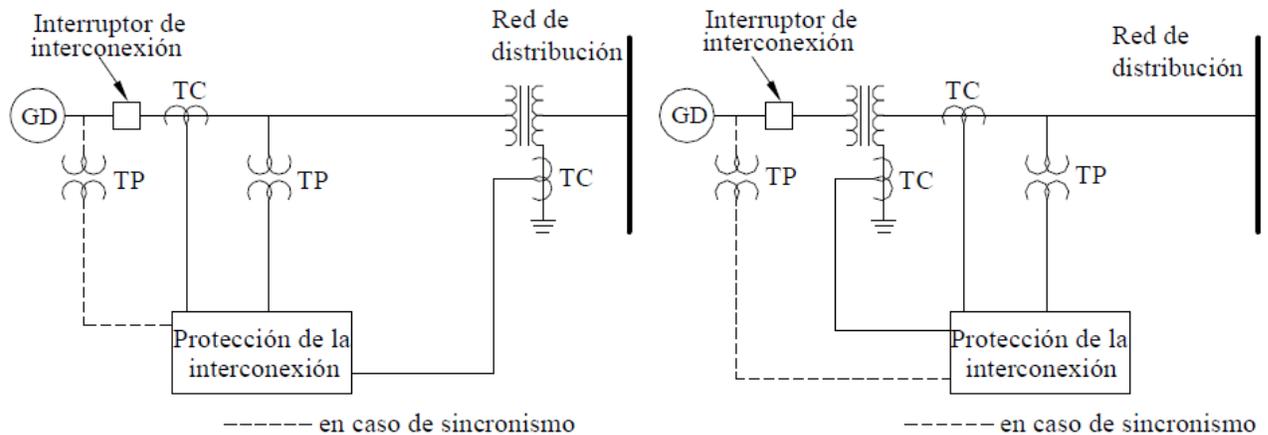


Figura 5.3 Ubicación de la protección de la interconexión de la fuente de GD a través de un transformador [21].

La función de éstos dispositivos de protección de la interconexión es proteger a la fuente de GD y a la red, de disturbios en la red de distribución, además de proteger ante fallas internas (entre el PI y las terminales de la GD) enviando la señal de disparo al interruptor de interconexión y así evitar las corrientes de falla.

Los esquemas de interconexión con la red de distribución pueden operar:

- a) Red aislada.
- b) Red no aislada (interconectada).

#### 5.4.1 Esquemas de interconexión para red aislada.

Estas fuentes operan normalmente por periodos cortos de tiempo. En este esquema la GD se conecta a la carga a través de un interruptor automático de transferencia solo si el suministro a través de la red ha sido desconectado. En este tipo de fuentes se pueden utilizar motores de combustión o turbinas de gas, trabajando entre los potencias menores a 500 kVA en baja tensión, de 10 MVA a 50 MVA en media tensión [21]. No es posible la operación en paralelo con una red u otra fuente de distribución.

##### 5.4.1.1 Esquema de protección de una fuente de GD de pequeña (500 kVA a 1 MVA).

La norma ANSI/IEEE Std. 242-2001 recomienda los siguientes dispositivos de protección: un relevador de sobrecorriente con restricción de voltaje (51V) para fallas de fase. Si el generador está conectado en estrella sólidamente aterrizado, los relevadores de sobrecorriente de fase captan la corriente utilizando TC's instalados en las fases que llegan al neutro del estator. También se incluye un relevador de sobrecorriente de neutro con retardo de tiempo (51N) para fallas a tierra conectando un TC en el neutro del generador (Fig. 5.4). Si el generador está conectado en delta el relevador 51V se alimenta de los TC's que están conectados en el lado de la línea en las terminales del devanado del generador (Fig.5.5). Estas redes están conectadas en baja tensión. La protección de interconexión para los generadores de inducción por lo general requiere únicamente relevadores de sobre/bajo voltaje y de frecuencia.

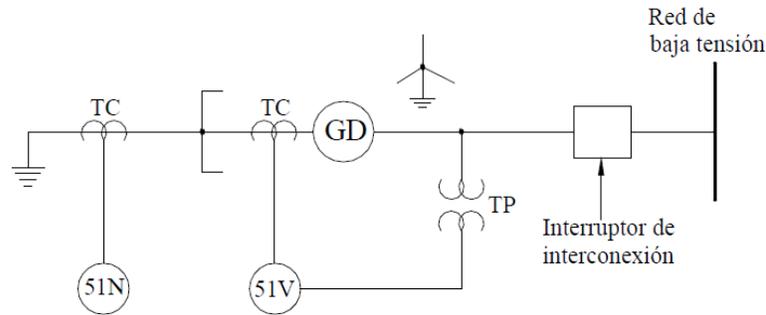


Figura 5.4 Protecciones de un pequeño generador conectado en estrella sólidamente aterrizado conectado a una red aislada de baja tensión.

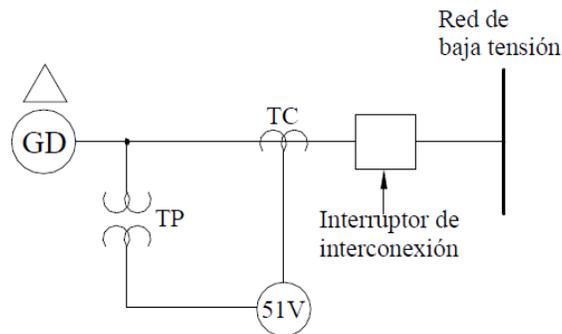


Figura 5.5 Protecciones de un pequeño generador conectado en delta conectado a una red aislada de baja tensión.

#### 5.4.1.2 Esquema de protección de una fuente de GD mediana (hasta 12.5 MVA).

La norma ANSI/IEEE Std. 242-2001 recomienda los siguientes dispositivos de protección en media tensión:

Relevador	Falla que cubre
<b>51V</b>	Fallas de fase.
<b>51N</b>	Fallas a tierra.
<b>87</b>	Fallas de fase. Protección diferencial de fase para el devanado del estator.
<b>32</b>	Detección de la pérdida del primo motor. Relevador de potencia inversa.
<b>46</b>	Desbalance de corrientes. Detecta corriente de secuencia negativa.
<b>64F</b>	Fallas a tierra del circuito de campo Protección del rotor

Tabla 5.1 Dispositivos de protección para un generador mediano conectado a una red aislada de media tensión

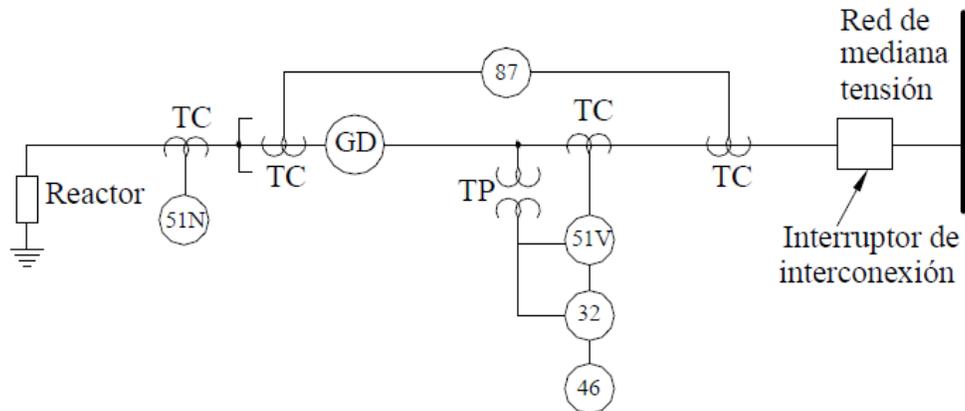


Figura 5.6 Protecciones de un generador mediano conectado a una red aislada de media tensión.

### 5.4.1.3 Esquema de protección de una fuente de GD (hasta 50 MVA)

La norma ANSI/IEEE Std. 242-2001 recomienda los siguientes dispositivos de protección: Los 6 tipos de relevadores descritos en la tabla 5.1 mas un relevador de balance de voltaje (60) para protección contra fallas en los fusibles de los TP's y un relevador térmico del estator (49) (Fig. 5.7).

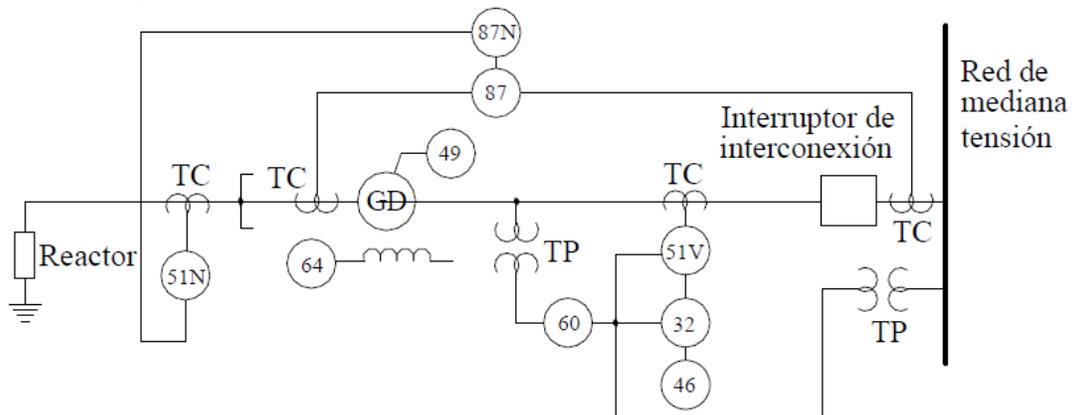


Figura 5.7 Protecciones de un generador de gran capacidad conectado a una red aislada de media tensión.

### 5.4.2 Esquemas de interconexión para red no aislada

En estos esquemas la GD opera en paralelo con la red de distribución, por lo que puede alimentar carga local y exportar energía excedente a la red. Igualmente se pueden conectar de forma directa o mediante un transformador.

#### 5.4.2.1 Esquema de protección de una fuente de GD de pequeña (500 kVA a 1 MVA).

La GD se conecta a una red de distribución de baja o media tensión y opera en paralelo. De acuerdo a [24] se recomiendan los siguientes dispositivos de protección:

Relevador	Falla que cubre
<b>51V</b>	Fallas de fase. Fallas sólidas a tierra en la interconexión.
<b>51N</b>	Fallas a tierra con retardo de tiempo.
<b>32</b>	Detección de la pérdida del primo motor. Relevador de potencia inversa. Detección de importación o exportación de potencia
<b>81U</b>	Detección de sobrecargas en el generador por pérdida parcial o total de la red
<b>81O</b>	Detección de pérdida de operación en paralelo con la red. Daños al generador por sobre velocidad ante la pérdida de carga.
<b>27</b>	Detección de depresiones de voltaje causadas por fallas cercanas a la red
<b>59</b>	Detección de sobrevoltajes por la re-inyección de carga Protección para la pérdida de operación en paralelo con la red

Tabla 5.2 Dispositivos de protección para un generador pequeño operando en paralelo con la red

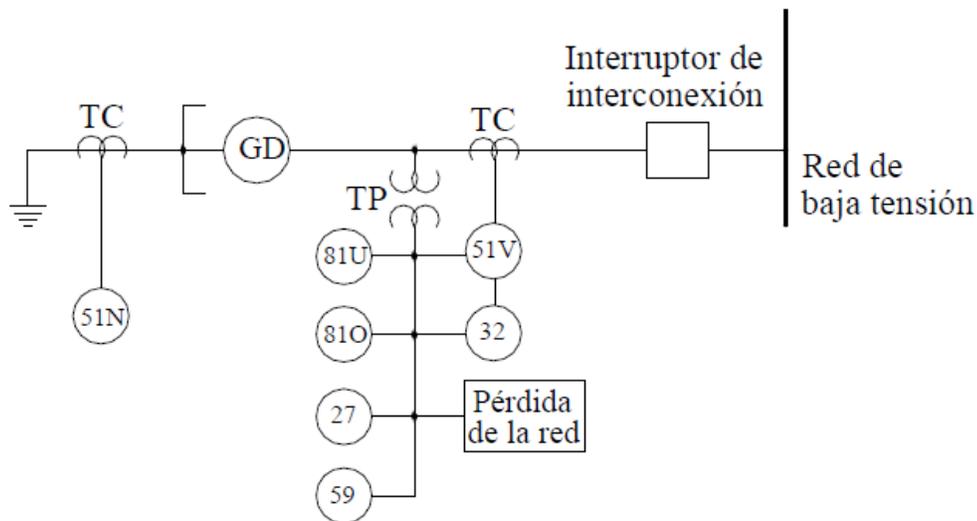


Figura 5.8 Protecciones generador pequeño operando en paralelo con la red de distribución en forma directa.

#### 5.4.2.2 Esquema de protección de una fuente de GD mediana (hasta 12.5 MVA).

Se recomiendan los mismos dispositivos que para un generador pequeño Tabla 5.2, pero sumando: un relevador 87 para detectar fallas de fase y de tierra en el devanado del generador. Los generadores síncronos requieren además un relevador 40 para detectar la pérdida de excitación (Fig. 5.9).

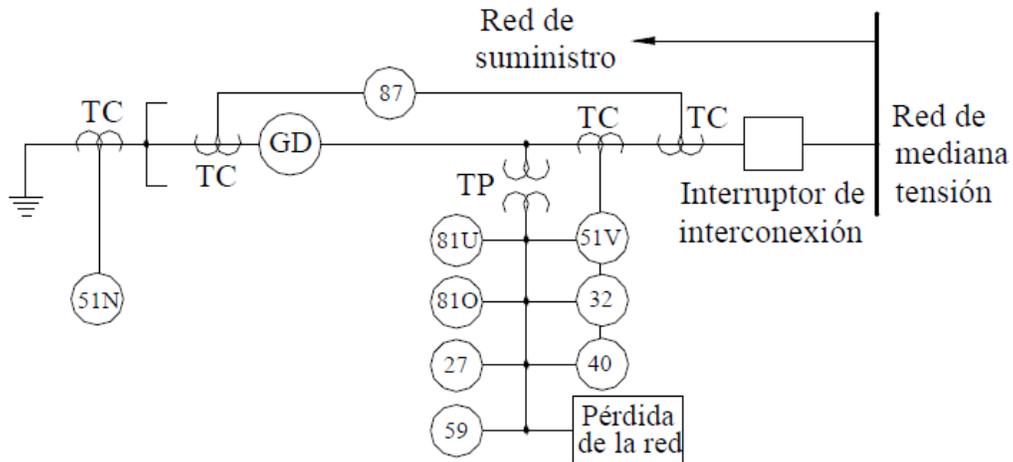


Figura 5.9 Protecciones de un generador operando en paralelo con la red de media tensión en forma directa.

### 5.4.2.3 Esquema de protección de una fuente de GD (hasta 50 MVA).

Se recomiendan los mismos dispositivos que para una fuente mediana, pero con la suma de: Relevador de sobrecorriente de secuencia negativa de fase (46) para detectar fallas de fase a fase y para el desbalance de carga. De nuevo los generadores síncronos requieren de un relevador (40) y protección para el rotor (64) para detectar fallas a tierra del devanado de campo del generador. Figura 5.11.

Los relevadores digitales de multifunción cuentan con diversas características que los hacen ideales para la protección de éste tipo de interconexiones [27].

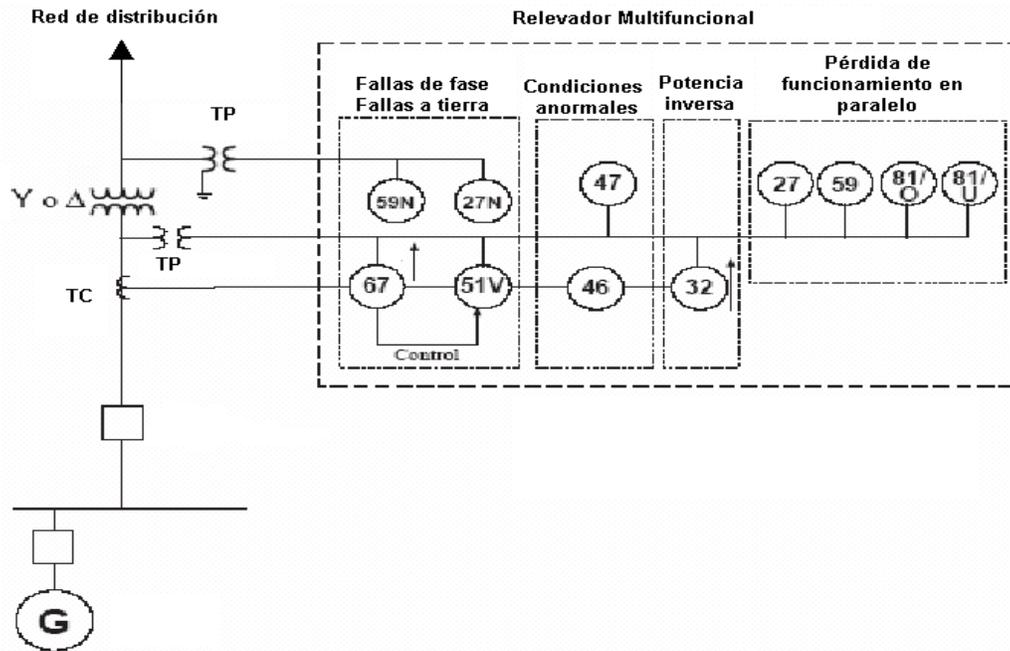


Figura 5.10 Ejemplo de funcionamiento de un relevador digital de multifunción [27].

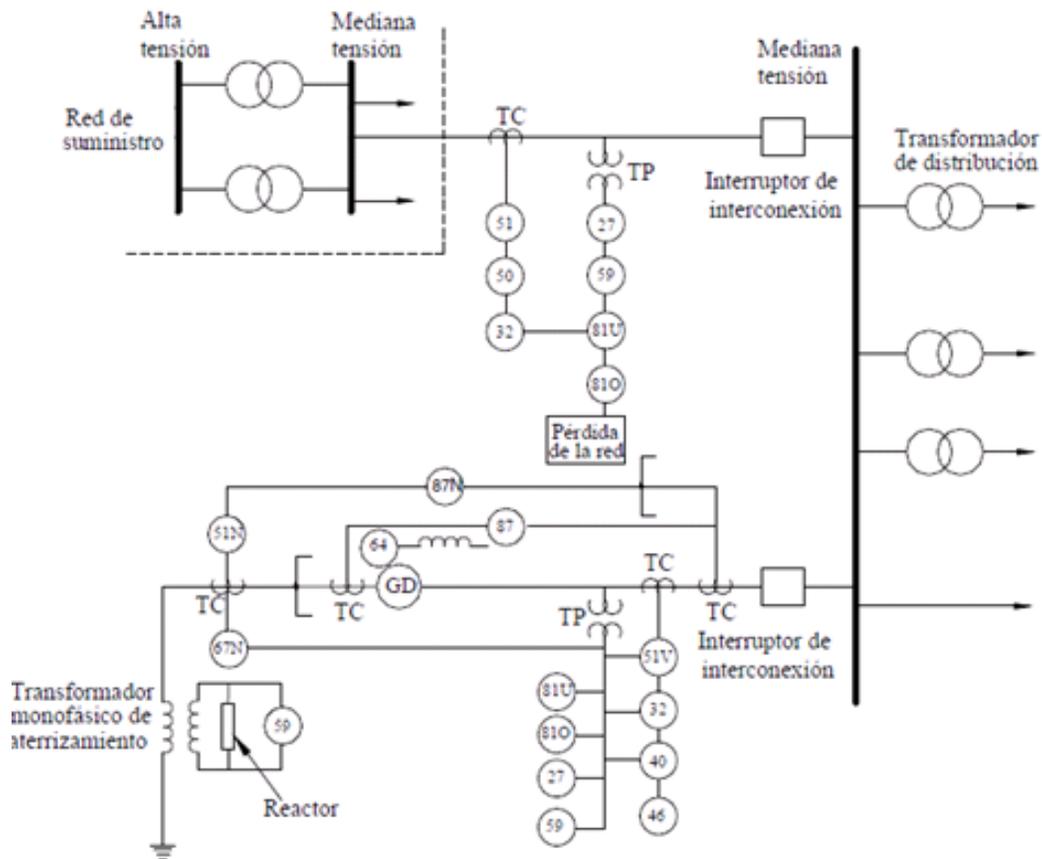


Figura 5.11 Protecciones de un generador alimentando carga industrial y operando en paralelo con la red de media tensión [26].

### 5.5 Ventajas de la generación distribuida en la granja.

- La GD deja de lado la necesidad de uso de redes de transmisión para hacer llegar energía a una granja en una zona aislada, lo que deja a un lado la inversión y pérdidas de energía relacionadas a estas.
- Participación de pequeñas y medianas empresas locales en negocios de generación de energía, ya que por lo regular la generación en escala convencional está limitada a empresas extranjeras multinacionales.
- Incremento en la confiabilidad y garantía en la calidad de energía.
- Reducción del número de interrupciones del servicio.
- Menor costo de la energía.
- Generación de energía y uso integral de energías renovables, como recurso propio de la granja.
- Facilidad y versatilidad de adaptación a las condiciones del sitio.
- Disminución de emisiones de GEI.
- Alto impacto en la seguridad e higiene industrial.

## **5.6 Aspectos legales.**

En México, en 1992 se abrieron a la inversión privada las actividades de cogeneración, autoabastecimiento, pequeña producción, producción independiente y exportación e importación de energía eléctrica, la GD como tal no se cita explícitamente en la Constitución Política de México, ni en sus leyes y reglamentos. Sin embargo, en las dos últimas se encuentran los instrumentos propios de regulación para las fuentes renovables de generación de energía eléctrica, que pueden ser aplicables a la modalidad llamada GD [29].

## **5.7 Aspectos económicos.**

### **5.7.1 Financiamiento**

La SAGARPA, a través del FIRCO apoya la promoción y difusión de la energía renovable, a través del “Programa del Fondo de Riesgo Compartido para el Fomento a Agronegocios (FOMAGRO)”. Dentro de los tipos de apoyo canalizados a través de este programa se consideran los relacionados con aportaciones directas y aportaciones para constituir garantías líquidas:

#### 1) Aportaciones Directas

Destinadas a financiar parcialmente las inversiones nuevas para la formulación de planes de agronegocios, de estudios y gastos preoperativos; asistencia técnica y capacitación agroindustrial, así como los necesarios para su equipamiento e infraestructura; éste último se refiere a: la adquisición y construcción de instalaciones fijas; a la adquisición y prueba de maquinaria y equipos que, para su funcionamiento intervenga algún tipo de energía renovable; necesarios para la producción de los bienes objeto del agronegocio, y que permitan iniciar o mejorar el funcionamiento de los mismos y contribuyan a su consolidación al tiempo que mejoran el medio ambiente [30].

#### 2) Aportaciones para constituir fuentes alternas de pago.

Este tipo de apoyo consiste en el otorgamiento de recursos, para complementar la constitución de fuentes alternas de pago que posibiliten la contratación de créditos para facilitar la incorporación de las empresas al crédito bancario [30].

## **5.8 Perfiles de generación de energía eléctrica.**

Antes de iniciar un proyecto, es necesario establecer la factibilidad para conocer la viabilidad y a partir de eso diseñar e implementar un sistema de generación distribuida.

Los tipos de factibilidades básicamente son [31]:

- Factibilidad técnica: si existe o está al alcance la tecnología necesaria para el sistema.
- Factibilidad operacional: si el sistema puede funcionar en la organización.
- Factibilidad económica: relación beneficio costo.

Partiendo de la Tabla 3.4, supondremos un rango de producción de biogás al día. Para calcular su potencial sabemos que para el biogás con 67% de CH<sub>4</sub> se tienen 6.5 kWh/m<sup>3</sup> de energía. Se plantea un escenario para una granja de 1000 cerdos.

Biogás al día (m <sup>3</sup> ) (1000 cerdos)		Energía disponible diaria (kWh)	Potencial de generación por FGD							
			Turbina de gas η=25-40%		Microturbina η=20-30%		Motor Otto η=30-45%		Celdas de H <sub>2</sub> η=30-50%	
			kWh		kWh		kWh		kWh	
<b>Min.</b>	165	1073	268	429	215	322	322	483	322	536
<b>Medio</b>	232,5	1511	378	605	302	453	453	680	453	756
<b>Máx.</b>	300	1950	488	780	390	585	585	878	585	975

Tabla 5.3 Potencial de generación de energía con distintas FGD.

Dentro del estudio técnico es necesario conocer la variación de kWh requeridos por la granja. Pensando en una demanda de 800 kWh al día, distribuidos de la siguiente forma:

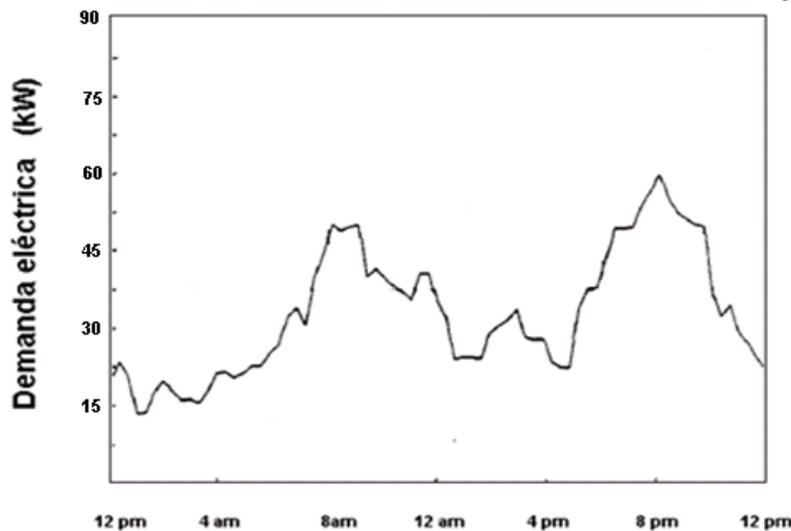


Figura 5.12 Variación de carga en una granja (1000 cerdos).

En la granja la iluminación, refrigeración, calefacción y ventilación, deben estar conectadas de forma permanente. Pensando en que los animales en las granjas requieren de cierta temperatura para su comodidad y crecimiento, la temperatura ambiente debe estar bien controlada, y se debe considerar que la demanda de energía para los aparatos que sostienen las dos últimas cambia con las condiciones ambientales y la época del año. El aumento súbito en la carga es debido al bombeo de agua y las mezcladoras y molinos para el alimento de los animales, ya que cada animal requiere de 5 a 15 litros de agua al día y en promedio 3 kg de alimento balanceado diariamente.

Pensando en el uso de las 4 fuentes de generación distribuida: turbina de gas, microturbina, motor Otto y celdas de hidrógeno de alta temperatura, con producciones de electricidad de 780 kWh, 585 kWh, 878 kWh y 975 kWh al día, respectivamente; cuya producción de energía se puede aprovechar durante distintos periodos de tiempo, se pueden adaptar distintos perfiles de generación para la demanda de electricidad de la granja.

Se observa en los perfiles que la potencia generada puede ser superior o inferior al consumo de la granja, por lo tanto cubrirá total o parcialmente la demanda en caso de trabajar en isla por problemas en la red de distribución.

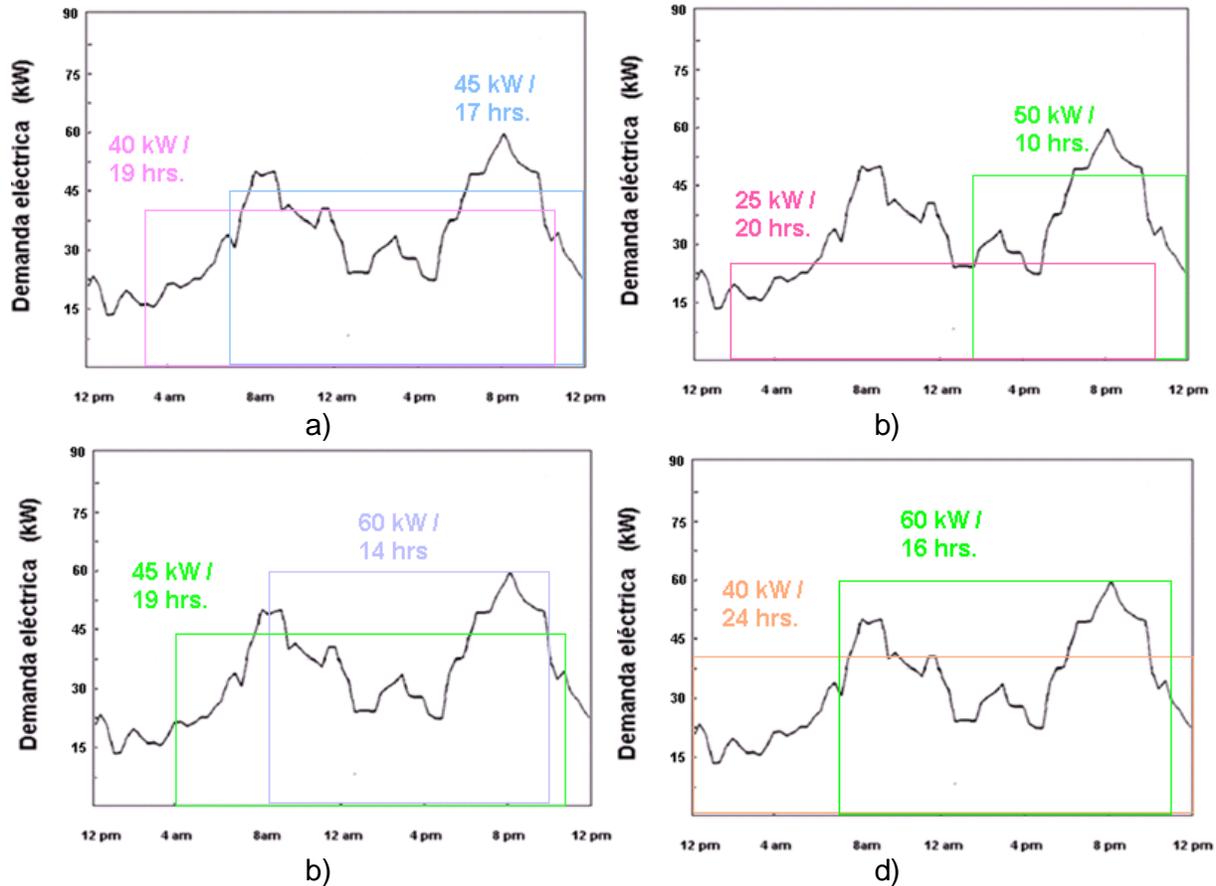


Figura 5.13 Perfiles de producción de electricidad para a) turbina de gas, b) microturbina, c) motor Otto y d) celda de hidrógeno

Otra forma de aprovechar la energía del biogás es disminuyendo la carga conectada a la red de distribución, acoplando algunos equipos de la granja directamente a el módulo de generación, por lo que se podrá optar por módulos pequeños y económicos que solo se enciendan en ciertas horas del día. El biogás excedente podrá quemarse para la contabilización de Certificados de Reducción de Emisiones, lo que puede ser muy redituable por que la inversión necesaria para quemar el biogás es muy baja.

Bajo éste nuevo esquema se debe cubrir un máximo de 170 kWh, pero lo cual se puede utilizar una microturbina o un motor Otto. Se podría elegir un módulo de 35 kW para encender el equipo aislado.

	Microturbina		Motor Otto	
	$\eta=20\%$	$\eta=30\%$	$\eta=30\%$	$\eta=45\%$
<b>Energía requerida (kWh)</b>	850	567	567	378
<b>Biogás al día (m<sup>3</sup>)</b>	130	87	87	58

Tabla 5.4 Energía requerida para suprimir los picos de carga

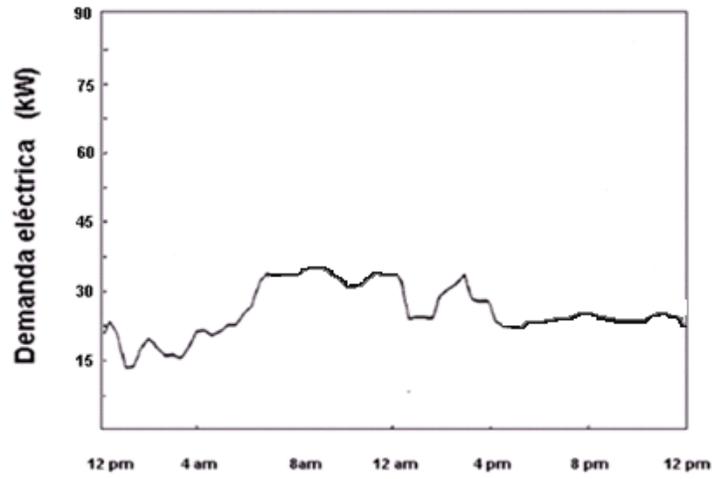


Figura 5.14 Variación de carga en una granja si se desconectan bombas de agua y mezcladoras de alimento (1000 cerdos).