

TABLA DE CONTENIDO

UNIDAD DIDÁCTICA 1 GENERACIÓN DISTRIBUIDA

INTRODUCCIÓN	19
1. TECNOLOGÍAS, TENDENCIAS Y EVOLUCIÓN DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA	21
1.1. Estado actual de los sistemas de generación eléctrica	21
1.1.1. Concepto de generación distribuida	23
1.2. Tecnologías para la generación distribuida	25
1.2.1. Cogeneración	26
1.2.1.1. Trigeneración	28
1.2.2. Turbinas eólicas	39
1.2.3. Instalaciones fotovoltaicas	40
1.2.4. Minihidráulicas	43
1.2.4.1. Potencial	45
1.2.5. Solar térmica	46
1.2.6. Residuos	49
1.2.7. Marinas	50
1.2.7.1. Energía mareomotriz	51
1.2.7.2. Energía térmica oceánica o mareomotérmica	52
1.2.7.3. Energía de las olas	54
1.2.7.4. Desarrollos en España	57
1.2.8. Geotérmicas	58
1.2.9. Pilas de combustible	59
1.3. Sistemas de almacenamiento energético en redes de generación distribuida	60
1.3.1. Complementariedad de la generación distribuida y los sistemas de almacenamiento energético. Sistemas de almacenamiento energético	61
1.3.1.1. Bombeo de agua	61
1.3.1.2. Aire comprimido	63
1.3.1.3. Volante de inercia (Flywheel)	64
1.3.1.4. Baterías	64

1.3.1.5.	SMES (Almacenamiento de Energía en Superconductores Magnéticos)	65
1.3.1.6.	Supercondensadores	66
1.3.1.7.	Almacenamiento térmico	67
1.3.1.8.	Hidrógeno	67
1.3.1.9.	Costos del almacenamiento de la energía	68
1.3.1.10.	Consideraciones sobre el almacenamiento de energía	69
	Cuestiones tema 1	71
	Bibliografía	76
2.	FACTORES FACILITADORES Y BARRERAS PARA EL DESARROLLO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA	77
2.1.	Integración de los sistemas de generación distribuida	77
2.1.1.	Factores facilitadores y ventajas	78
2.1.1.1.	Ventajas técnicas	82
2.1.1.2.	Ventajas económicas	83
2.1.1.3.	Ventajas medioambientales	84
2.1.2.	Barreras	85
	Cuestiones tema 2	92
	Bibliografía	96
3.	INTERCONEXIÓN A LA RED DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA	97
3.1.	Sistemas de interconexión a la red de los sistemas de generación distribuida	97
3.1.1.	Componentes del sistema de interconexión	97
3.1.1.1.	Conexión a la red	97
3.1.1.2.	Equipos de medida	98
3.1.1.3.	Red de Distribución y Transporte	100
3.1.1.4.	Equipos de comunicación	101
3.1.1.5.	Monitorización	102
3.1.1.6.	Conversión de energía	104
3.1.1.7.	Aparamenta de conexión	104
3.1.2.	Descripción de las infraestructuras eléctricas en España	105
3.1.3.	Gestión del Sistema Eléctrico	108
3.1.3.1.	Introducción y contexto actual	108
3.1.3.2.	Vertidos de energía renovable	111
3.1.3.3.	Propuestas de actuación para la integración de energías renovables	112
3.1.3.4.	Gestión de la demanda	114

3.2.	Impacto de las redes de generación distribuida en los sistemas eléctricos	117
3.2.1.	Impacto en las potencias de cortocircuito	117
3.2.1.1.	Red de transporte	119
3.2.1.2.	Sistema de distribución	120
3.2.1.3.	Potencias máximas de las centrales interconectadas en baja tensión	121
3.2.1.4.	Conclusiones sobre la potencia de cortocircuito	122
3.2.2.	Influencia de la generación distribuida en los servicios complementarios	123
3.2.2.1.	Control frecuencia potencia	123
3.2.2.2.	Control Tensión-Reactiva	134
3.2.2.3.	Arranque autónomo y operación en isla	140
	Cuestiones tema 3	145
	Bibliografía	150
4.	DISEÑO, MONTAJE, GESTIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA RED DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA	151
4.1.	Conceptos generales sobre dimensionado de sistemas de generación distribuida	151
4.1.1.	Diseño de instalaciones de generación distribuida para vertido a red	152
4.1.2.	Diseño de instalaciones de generación distribuida para autoconsumo	152
4.1.3.	Diseño de instalaciones en balance neto	152
4.2.	Sistemas de generación distribuida para generación conjunta de calor y electricidad. Cogeneración	154
4.2.1.	Justificación de la cogeneración	156
4.2.2.	Aplicaciones de la cogeneración	158
4.2.2.1.	Aplicaciones en el sector industrial	158
4.2.2.2.	Aplicaciones en el sector servicios	159
4.2.3.	Equipos para cogeneración	160
4.2.3.1.	Producción de sólo electricidad	163
4.2.3.2.	Electricidad y calor combinados (CHP)	164
4.2.3.3.	Diseño de instalaciones de cogeneración. Necesidades energéticas en instalaciones de cogeneración	165
4.3.	Criterios de diseño, montaje, gestión y mantenimiento de instalaciones de generación distribuida	170
4.3.1.	Energía eólica para generación distribuida	170

4.3.1.1.	Caracterización energética del viento para el uso en redes de generación distribuida	171
4.3.1.2.	Tipos de aerogeneradores	176
4.3.2.	Energía solar	178
4.3.2.1.	La naturaleza de la energía solar	178
4.3.2.2.	Los movimientos de la Tierra	179
4.3.2.3.	La radiación solar	180
4.3.3.	El módulo fotovoltaico	183
4.3.3.1.	Clasificación de las células FV	183
4.3.3.2.	Comportamiento eléctrico	185
4.3.4.	Estructura soporte de los módulos fotovoltaicos.	186
4.3.5.	Dispositivos de orientación de los módulos	188
4.4.	Sistemas híbridos fotovoltaicos-eólicos para generación distribuida ..	189
4.4.1.	El acumulador eléctrico	191
4.4.2.	El regulador	194
4.4.3.	El inversor	195
4.4.4.	Grupo electrógeno	195
4.4.5.	Disposiciones legales y normas aplicadas	196
4.5.	Criterios de diseño	196
4.5.1.	Ubicación	196
4.5.1.1.	Lugar de instalación de la instalación fotovoltaica ..	197
4.5.2.	Determinación de potencia instalada	197
4.5.3.	Justificación del uso de sistemas híbridos en redes de generación distribuida	199
4.5.4.	Diseño de las soluciones	201
4.5.4.1.	Aerogeneradores eólicos para generación distribuida ..	201
4.5.4.2.	Determinación de la altura de la torre del aerogenerador ..	204
4.5.4.3.	Diseño de instalaciones fotovoltaicas integradas en sistemas híbridos para generación distribuida	214
4.5.4.4.	Inversores para instalaciones de generación distribuida ..	242
4.5.4.5.	Diseño de sistemas de cogeneración y trigeneración en generación distribuida	246
4.6.	El autoconsumo y el balance neto	263
4.6.1.	Paridad de red	263
4.6.1.1.	Cálculo de la llegada de la paridad de red en la energía fotovoltaica	265
4.6.2.	El autoconsumo por Balance Neto. Definición	268
4.6.2.1.	Futuro del autoconsumo y el Balance Neto. Caso español ..	272

4.7.	Impacto socioeconómico del autoconsumo con balance neto en las instalaciones fotovoltaicas en España	277
4.7.1.	Efecto de la generación distribuida a nivel socio económico .	278
4.8.	Contenido de proyectos de energía fotovoltaica en generación distribuida ...	278
4.8.1.	Memoria descriptiva	278
4.8.1.1.	Antecedentes y objeto del Proyecto	278
4.8.1.2.	Peticionario, promotor y titular de la instalación ...	279
4.8.1.3.	Descripción de la actividad y del edificio o local ...	279
4.8.1.4.	Componentes de la instalación	279
4.8.1.5.	Reglamentación	279
4.8.1.6.	Solución adoptada. Diseño de la instalación	279
4.8.1.7.	Programa de ejecución	279
4.8.1.8.	Documentación	280
4.8.2.	Memoria de cálculo	280
4.8.2.1.	Radiación solar	280
4.8.2.2.	Cálculo del número de módulos fotovoltaicos. Factor de seguridad	280
4.8.2.3.	Cálculo de la capacidad de acumulación	280
4.8.2.4.	Cálculo del regulador	280
4.8.3.	Planos	281
4.8.3.1.	Generales	281
4.8.3.2.	Situación y emplazamiento	281
4.8.3.3.	Distribución en parcela	281
4.8.3.4.	Plantas, secciones y alzados	281
4.8.3.5.	Detalles y esquemas de la instalación	281
4.8.4.	Pliego de condiciones	281
4.8.4.1.	Características de equipos y materiales	281
4.8.4.2.	Normativa vigente	281
4.8.4.3.	Uso, mantenimiento y seguridad	282
4.8.4.4.	Certificados y documentación	282
4.8.4.5.	Condiciones facultativas	282
4.8.4.6.	Condiciones económicas y legales	282
4.8.4.7.	Mediciones y presupuesto	282
4.8.5.	Estudio de Seguridad y Salud	282
4.9.	Guía de contenido mínimo para proyectos de cogeneración	282
4.9.1.	Memoria descriptiva	283
4.9.1.1.	Antecedentes y objeto del proyecto	283
4.9.1.2.	Peticionario, promotor y titular de la instalación ...	283
4.9.1.3.	Situación y emplazamiento de la instalación	283

4.9.1.4.	Descripción del solar, edificio o local donde se instalará la planta de cogeneración	283
4.9.1.5.	Reglamentación	284
4.9.1.6.	Situación actual. Marco legal	284
4.9.1.7.	Justificación de la solución adoptada	284
4.9.2.	Balance energético y rendimientos	285
4.9.3.	Justificación de la Tecnología elegida	286
4.9.4.	Resultados del análisis económico	286
4.9.5.	Descripción del proceso termodinámico	287
4.9.6.	Descripción del proceso eléctrico	287
4.9.7.	Condiciones operacionales	287
4.9.8.	Emplazamiento de los equipos principales	287
4.9.9.	Descripción de los equipos principales y auxiliares	287
4.9.10.	Descripción de las instalaciones	288
4.9.11.	Personal y puestos de trabajo	288
4.9.12.	Programa de ejecución	288
4.9.13.	Memoria de cálculo	289
4.9.13.1.	Datos de partida	289
4.9.13.2.	Demanda prevista. Planteamiento y simulación de alternativas	290
4.9.13.3.	Elección de los equipos principales	290
4.9.13.4.	Cálculo de equipos auxiliares	291
4.9.13.5.	Cálculo de rendimientos y ahorros	292
4.9.13.6.	Estudio de viabilidad económica	294
4.9.14.	Planos	299
4.9.14.1.	Planos generales y de distribución	300
4.9.14.2.	Plantas y secciones de instalaciones	301
4.9.14.3.	Detalles. Esquemas de proceso y diagramas	301
4.9.15.	Pliego de condiciones	302
4.9.15.1.	Calidades y características de los materiales y de los equipos empleados en la instalación	302
4.9.15.2.	Normas de ejecución de instalaciones	302
4.9.15.3.	Pruebas, ensayos y verificaciones reglamentarias ...	302
4.9.15.4.	Condiciones de uso, mantenimiento y seguridad ...	302
4.9.15.5.	Certificados y documentación	302
4.9.15.6.	Libro de órdenes	302
4.9.16.	Mediciones y presupuesto	302
4.9.16.1.	Inversión inicial	302
4.9.16.2.	Obra civil	303
4.9.16.3.	Maquinaria y equipos	303
4.9.16.4.	Instalaciones	303

4.9.17. Seguridad y salud	303
4.9.17.1. Estudio completo de seguridad y salud	303
4.9.17.2. Estudio básico de seguridad y salud	303
4.9.18. Estudio impacto medioambiental	303
Cuestiones tema 4	304
Bibliografía	309
5. IMPACTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LOS NEGOCIOS DE RED	311
5.1. Introducción	311
5.2. Influencia de la generación distribuida en la planificación y diseño de la red	313
5.2.1. Criterios técnicos de conexión a la red	314
5.2.2. Nuevas inversiones en la red	316
5.3. Influencia de la generación distribuida en la operación y explotación de la red	325
5.3.1. Influencia de la generación distribuida en la operación y la explotación de la red	325
5.3.1.1. Red de reparto	325
5.3.1.2. Red de media tensión y baja tensión	328
5.3.2. Influencia de la generación distribuida en las pérdidas	328
5.3.2.1. Definiciones	328
5.3.2.2. Normativa y regulación	329
5.3.3. Impacto de la generación distribuida en las pérdidas	331
5.3.3.1. La ubicación de la generación distribuida en la red de distribución y la topología de la red	331
5.3.4. Influencia de la generación distribuida en la calidad de servicio	333
5.3.4.1. La calidad de producto	334
5.3.4.2. Impacto de la generación distribuida en la calidad de producto	337
5.3.5. Influencia de la generación distribuida en la seguridad del personal de mantenimiento	351
Cuestiones tema 5	353
Bibliografía	359
6. ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	361
6.1. La generación distribuida y el medio ambiente	361
Cuestiones tema 6	369
Bibliografía	372

7. LEGISLACIÓN Y NORMATIVA EN GENERACIÓN DISTRIBUIDA	373
7.1. Regulación en generación distribuida	373
7.1.1. Contexto Europeo	373
7.1.2. Contexto Nacional	374
Bibliografía	387
8. EJERCICIOS PRÁCTICOS RESUELTOS	389
9. SOLUCIÓN A LAS CUESTIONES PRÁCTICAS	415
9.1. Soluciones a cuestiones tema 1	415
9.2. Soluciones a cuestiones tema 2	422
9.3. Soluciones cuestiones tema 3	426
9.4. Soluciones cuestiones tema 4	432
9.5. Solución cuestiones tema 5	438
9.6. Soluciones cuestiones tema 6	444

LA UNIDAD DIDÁCTICA 2. REDES INTELIGENTES, SE DESARROLLA A PARTIR DE LA PÁGINA 449.

1

TECNOLOGÍAS, TENDENCIAS Y EVOLUCIÓN DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA

1.1. ESTADO ACTUAL DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

El sistema de generación eléctrica, y en definitiva el sistema de suministro eléctrico, comprende el conjunto de instalaciones de generación, transporte y la distribución de la energía eléctrica, estando todo ello dotado de mecanismos de control, seguridad y protección, con los que se garantice una explotación racional de los recursos de generación y una calidad de servicio acorde con la demanda de los usuarios, compensando las posibles incidencias y o defectos producidos en la red.

La red de transporte, como las subestaciones asociadas a ella, suele ser propiedad de las empresas eléctricas, siendo realizado el transporte, en el caso español, por el Operador del Sistema, y la distribución por las compañías distribuidoras, siendo, en el caso de las instalaciones de generación, operadas y gestionadas por las compañías propietarias de las centrales. No debemos olvidar, por supuesto, que el objetivo de estos enormes sistemas es dar suministro eléctrico a los usuarios que lo demandan, para cada uno de los diferentes niveles de tensión.

Todo este sistema precisa de una organización económica centralizada que planifique la producción y la remuneración a los distintos agentes del mercado, ya que, como ocurre actualmente en muchos casos, existen múltiples empresas participando en las actividades de generación, transporte, distribución y comercialización.

En la Figura 1, mostrada a continuación, se pueden observar, en un diagrama esquematizado, las distintas partes componentes del sistema de suministro eléctrico:

La existencia de este tipo de sistema para abastecer la demanda de los consumidores es consecuencia del hecho de la existencia de economías de escala en el nivel de generación, hasta ahora derivadas del crecimiento de la eficiencia con el aumento de la potencia de los generadores.

Debido a esas economías de escala, la estructura actual de los sistemas de energía eléctrica dio lugar a unidades de generación de gran tamaño, pues era más conveniente desde un punto de vista económico y dejando de lado la incorporación de pequeñas unidades de generación cercanas a los puntos de consumo. Pero con el paso del tiempo se

han producido nuevos desarrollos que han cambiado el panorama con respecto a las ya referidas economías de escala, ya que el desarrollo económico y el progreso constante de la tecnología han acelerado el hecho de que el tamaño óptimo de las unidades de generación disminuya, surgiendo condiciones diferentes en cuanto a la competencia en el mercado de generación de unidades de producción más pequeñas, con posibilidades de acercarse más a la demanda de grandes y pequeños consumidores.

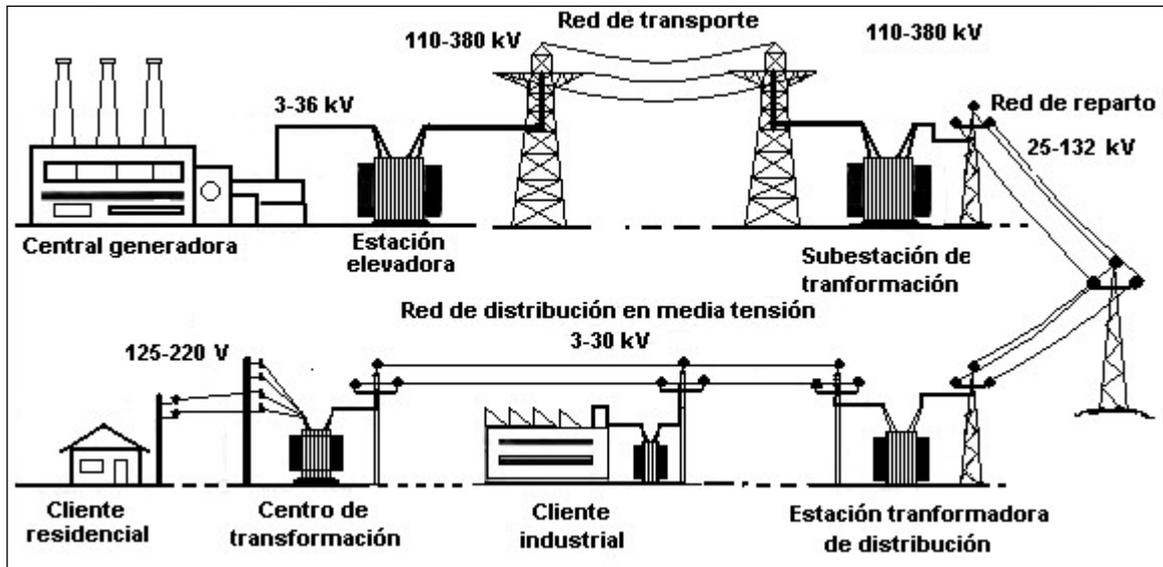


Figura 1. Sistema convencional de energía eléctrica

Por lo tanto, gracias al desarrollo tecnológico, se han producido importantes variaciones en los costes de generación que están cambiando la evolución histórica de principios del siglo XX. Anteriormente se promocionaba la instalación de grandes generadores, con una clara tendencia al aumento de la potencia de los generadores para la obtención de un mínimo coste por MW generado, dando lugar a que a finales del citado siglo, los avances en las tecnologías, sobre todo de generación con gas, produzca una reducción de costes por unidad de potencia generada, propiciando centrales de menor tamaño y potencia generada, ya que, además, muchas tecnologías no producen cambios importantes en la eficiencia al tener generadores de menor potencia. Esto en contraste con el pasado donde había una importante pérdida de eficiencia al hacer uso de generadores pequeños, con las consiguientes pérdidas económicas adicionales que hacían aún más justificable el uso de grandes generadores.

Con este cambio acaecido (el tamaño menor de los nuevos generadores) no es necesario hacer grandes inversiones en los sistemas de transmisión de energía, por la clara posibilidad de conectarse de modo directo en el nivel de distribución, y así poder generar directamente desde donde se realiza el consumo de energía, llegando con ello al concepto de cambio de la topología de los circuitos eléctricos en los sistemas de energía eléctrica, conocido como «generación distribuida», dando lugar a que la generación ya no sea exclu-

siva del nivel de tensión de Transporte, y el flujo de potencia no sea unidireccional, ya que pueden, a su vez, producirse aportaciones de la generación distribuida dentro de los niveles de Distribución, ya sea en media o en baja tensión.

Con todos estos cambios previstos, parte de la energía demandada es proporcionada por los generadores centrales convencionales, mientras que otra es producida mediante generación distribuida. Otro de los conceptos que se introducen, con todas las afirmaciones anteriores, es el de autogeneración y autoconsumo de energía, es decir, aquellos casos donde un consumidor produce energía eléctrica para sí mismo, para su consumo total o parcial, aunque este tipo de generación también es considerado como generación distribuida.

1.1.1. Concepto de generación distribuida

No hay una definición exacta sobre lo que es la generación distribuida, ya que dicha definición puede realizarse en función de la potencia, lugar donde se conecta en la red, tecnología empleada, etc. Pero está claro que la generación distribuida debe ser aquella que está más cerca del consumidor, ya que incluso en muchos de sus casos es el propio consumidor el que la genera, adoptando el papel de «prosumidor» (productor-consumidor), y que va a estar conectado a la red de baja o media tensión (distribución), e incluso a la red de transporte si es que en esos puntos existen grandes consumos, aunque en menos casos. También podrá utilizarse este concepto cuando se hable de generaciones con consumos aislados de la red eléctrica.

La definición genérica o consensuada para la generación distribuida no existe, ya que en las publicaciones existentes al respecto, las definiciones de generación distribuida guardan similitud pero no son únicas y difieren en algunos aspectos. Además, para el mismo tipo de generación se emplean diferentes términos, por ejemplo, generación incrustada, generación dispersa, generación descentralizada, autogeneración, etc.

A continuación, se exponen algunas de las definiciones que se encuentran en la bibliografía consultada y que constituyen los parámetros de referencia a nivel nacional e internacional para este tipo de sistemas.

El **Consejo Internacional sobre Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE)** define la generación distribuida como todos los generadores con una capacidad máxima entre 50 MW a 100 MW, conectados al sistema eléctrico de distribución, y que no están diseñados ni despachados de forma centralizada. Esto último implica que la generación distribuida no forma parte del control del operador de la red eléctrica de transporte, por tanto, no considera generación distribuida a los generadores instalados por las compañías eléctricas, y que son despachados por el operador de la red eléctrica de transporte.

Otro organismo de referencia internacional, la **Agencia Internacional de la Energía (IEA, International Energy Agency)**, en 2002, la define como la producción de energía en las

instalaciones de los consumidores o en las instalaciones de la empresa distribuidora, suministrando energía directamente a la red de distribución, en baja tensión, asociándose a tecnologías como motores, mini y micro-turbinas, pilas de combustible y energía solar FV.

Por otro lado, la definición de generación distribuida más consensuada es la de **Ackermann y colaboradores**. Estos autores proponen una definición de generación distribuida según su propósito, ubicación, potencia, tecnología, impacto medioambiental, modo de operación, propiedad y penetración de la generación distribuida.

Hay que remarcar que uno de los aspectos considerados más relevantes, sobre el propósito de la generación distribuida y de su ubicación, es el de que es una fuente de potencia eléctrica conectada directamente a la red de distribución o en las instalaciones de los consumidores. La distinción entre red de distribución y red de transporte la dejan supeditada a lo establecido legalmente en cada país. A pesar de estas pequeñas diferencias, o consideraciones en función del país, el concepto de generación distribuida y la normativa básica es similar en todos los países.

En general, y teniendo en cuenta aspectos regulatorios para el sector eléctrico español, se puede decir que en España se entiende por generación distribuida:

- Pequeña potencia y ubicación en puntos cercanos al consumo.
- Estar conectada a la red de distribución.
- Es frecuente que una parte de dicha generación sea consumida («técnicamente») por la misma instalación y el resto se exporte a una red de distribución.
- No existe una planificación centralizada de dicha generación y no suele despacharse centralizadamente.
- La potencia de los grupos suele ser menor de 50 MW.
- La generación distribuida no controlada se considera aquella de potencia menor o igual a 10 MW.

En España, puede «asimilarse» la generación distribuida al Régimen Especial (RE).

A nivel europeo, y sobre todo de Estados Unidos, casi tanto como el concepto de generación distribuida, se utiliza el concepto **Recurso de Energía Distribuida** (Distributed Energy Resource, DER) que agrupa tanto la generación distribuida como el almacenamiento de energía.

Si hablamos de niveles de tensión y tecnologías utilizadas, con respecto a los niveles de tensión utilizados, lo más lógico será que la conexión se realice en baja tensión, ya que de esa forma el concepto de generación distribuida alcanzaría a un mayor número de consumidores. En lo que respecta a tecnologías, según la regulación existente, el concepto es aplicable tanto al régimen ordinario como al régimen especial, aunque lo que dice la Agencia Internacional de la Energía (AIE) es que deberá ser únicamente para las generaciones que se conecten a las redes de distribución de baja tensión, y con tecnologías tales como la fotovoltaica, mini eólica, pilas de combustible, o pequeñas cogeneraciones en las que se compaginen electricidad y calor.

Respecto al tamaño de las generaciones a utilizar, no hay un acuerdo explícito, ya que aunque en España el Régimen Especial (RE) nos habla de instalaciones de hasta 50 MW, esto no parece lo más adecuado aunque el uso de instalaciones conectadas en baja tensión hasta 100 kW e incluso 1 MW (conexiones directas a la red de baja tensión, o conexiones al embarrado de los transformadores media/baja tensión), o en media tensión hasta 10 MW podrían ser bastante útiles como generación distribuida.

Por otra parte, además de tener en cuenta el suministro eléctrico, también determinados tipos de generación, suelen llevar asociado el aprovechamiento del calor, si la tecnología utilizada produce electricidad y calor en su proceso de generación.

Además del nivel de tensión, existe otra particularidad a tener en cuenta, y es si la generación de energía eléctrica se realiza en conexión directa con las distribuidoras o transportistas, o dentro del sistema eléctrico de las empresas, o sea en su red interna, ya que esto tiene también ahorros económicos.

En estos conceptos de generación distribuida, no debe olvidarse a los sistemas de almacenamiento, ya que también deberán ser considerados, por estar asociados a los sistemas de Generación distribuida.

1.2. TECNOLOGÍAS PARA LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Prácticamente todas las tecnologías renovables son aptas para la generación eléctrica distribuida desde el momento en que alcanzan su madurez tecnológica que les permita suministrar una energía segura y de calidad a un precio razonable. Además de los sistemas de generación basados en energías renovables existen tecnologías basadas en combustibles y fuentes energéticas convencionales (principalmente gas natural). Para producción de electricidad se incluyen, desde los motores térmicos alimentados a gasóleo o a gas natural, hasta las instalaciones fotovoltaicas, pasando por las termosolares tipo Stirling, la cogeneración, la biomasa, la eólica, la hidráulica y otras todavía en estado embrionario; así como la amplia gama que opera con la transferencia directa de calor. En particular, todas las renovables son aptas para un sistema eléctrico de generación distribuida.

Cuando se centra la actividad al segmento de autoconsumo eléctrico de energía, serán el recurso renovable existente, la modularidad, la robustez y los costes de inversión y mantenimiento, las variables fundamentales que orienten la elección de la tecnología más adecuada a cada caso particular.

Las tecnologías de biomasa, eólica y solar fotovoltaica pueden cubrir ya hoy el espectro del autoconsumo de energía. Dentro de ellas, la fotovoltaica parece destinada a cubrir la mayor parte de la potencia demandada en los próximos cuatro a diez años, seguida por la minieólica y la biomasa. La generación distribuida, por lo tanto, se puede definir como generación en instalaciones relativamente pequeñas, en general inferiores a 10 MW, que se sitúan cerca de los consumos y conectadas a la red de distribución en media y baja ten-

sión normalmente, y que complementan a la generación tradicional de grandes unidades conectadas generalmente a la red de transporte.

La generación distribuida además de acercarse al consumo, va a dar lugar a que en algunos casos generador (productor) y consumidor sean una misma entidad (prosumidor).

En la definición de generación distribuida no tiene por qué hacerse referencia a tecnologías de generación específicas, pero las tecnologías más adecuadas para el uso como generación distribuida, serán tanto los sistemas de generación considerados como de generación ordinaria como los basados en energías renovables. En cuanto a las tecnologías convencionales cabe la pena destacar sistemas tales como:

- Cogeneración
- Turbinas de gas
- Motores de combustión interna
- Microturbinas

En el caso de tecnologías basadas en energías renovables los sistemas más destacados son:

- Turbinas eólicas
- Instalaciones fotovoltaicas
- Minihidráulicas
- Solar térmica
- Residuos
- Marinas
- Geotérmicas

Es evidente, además, que todo este tipo de tecnologías no se encuentran en el mismo estado de madurez, y por lo tanto cada una de ellas jugará un papel determinado en función de su grado de desarrollo, y que el coste final dependerá de forma directa de ese grado de madurez.

Se analizan y estudian de ahora en adelante las diferentes tecnologías de generación distribuida.

1.2.1. Cogeneración

La cogeneración se define como la generación simultánea de energía térmica y eléctrica, por lo tanto esto produce un aumento de la eficiencia en el sistema al sumarse ambas en el sistema de generación, entendiendo eficiencia como relación entre la energía útil entregada, con respecto a la que obtenemos por el combustible utilizado (en un motor o una turbina, la eficiencia puede ser del 25% al 35%, mientras que en el caso de una cogeneración se puede llegar a aprovechar el 70% al 85% de la energía que entrega el combustible).

La tecnología usada en cogeneración es muy variada, dominando los motores de gas y motores diesel en las instalaciones de baja potencia unitaria (por debajo de 10 MW) y las

turbinas de gas (con o sin ciclo combinado) y las turbinas de vapor (con caldera de fuelóleo) para las potencias mayores.

En el caso de motores de gas y motores diesel, la participación de fabricantes españoles es considerable, aunque en total actúan en el mercado una docena de suministradores, (algunos de ellos extranjeros con buen asentamiento en el país). La dependencia es mayor, respecto del extranjero, en el caso de las turbinas, pero aun así cabe concluir que no parece haber impedimentos tecnológicos relevantes para la cogeneración clásica. El esquema típico de una planta de cogeneración se muestra en la Figura 2.

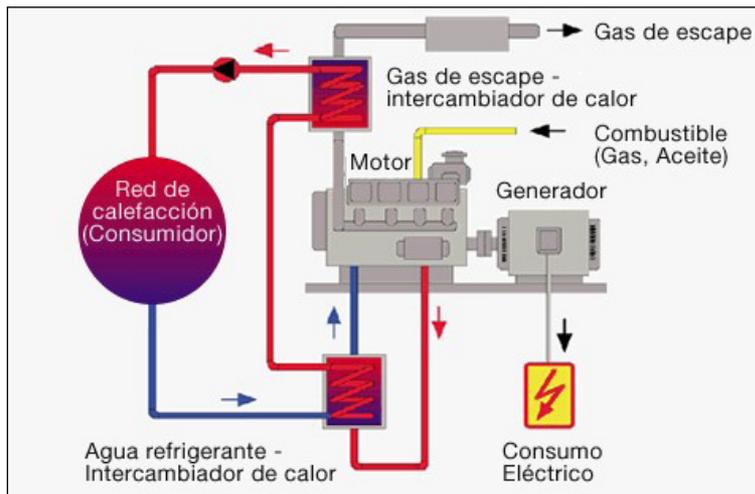


Figura 2. Esquema típico de una planta de cogeneración

Aunque las escalas de cogeneración posiblemente experimentarán un desarrollo importante hacia potencias unitarias altas, hay que prestar atención especial a las potencias bajas y medias, con posibilidades de expansión del mercado. En este contexto es fundamental el problema del mantenimiento, que puede encarecer notoriamente estas instalaciones pequeñas, si además requieren mucho personal para su atención. De ahí que exista un especial interés para la I+D+i nacional de fomentar el desarrollo de motores de explosión de gas (natural o de síntesis, incluido el de biomasa) con prestaciones de alta fiabilidad y bajo mantenimiento.

Por sectores industriales, son la Alimentación, Materiales de Construcción, Papelera, Química y Refino los más activos en el campo de la cogeneración. Cabe lanzar una actuación de difusión para encontrar nuevas áreas industriales para su expansión. En concreto, las relativas a la biomasa y residuos (como industrias agropecuarias, madera, etc.) podrían ser nuevas plataformas para cogeneración.

Como inconveniente específico de la cogeneración hay que señalar su dependencia respecto de otros fines, los específicamente industriales del autogenerador. Lógicamente, cuando las plantas productoras de éste cierran (p. e., en vacaciones), no suele tener senti-

do que las instalaciones de cogeneración funcionen (en algunos casos, no queda en la planta ni el personal de operación).

Un paso más allá en sistemas de cogeneración es la trigeneración, aproximación en la que se produce electricidad, calor y frío.

1.2.1.1. Trigeneración

Se define un sistema de trigeneración como la producción conjunta, de electricidad, calor y frío, a partir de un único combustible. A nivel energético una planta de trigeneración es conceptualmente igual a una de cogeneración a la que se le añade un sistema de absorción para la producción de frío.

Las plantas de trigeneración presentan un elevado rendimiento y posibilitan una gran reducción del coste energético de los procesos productivos especialmente en los procesos en los que se requieren importantes cantidades de calor en forma de vapor o agua caliente, frío industrial o energía eléctrica. En la Figura 3 se muestra el esquema conceptual del flujo energético en un sistema de trigeneración.

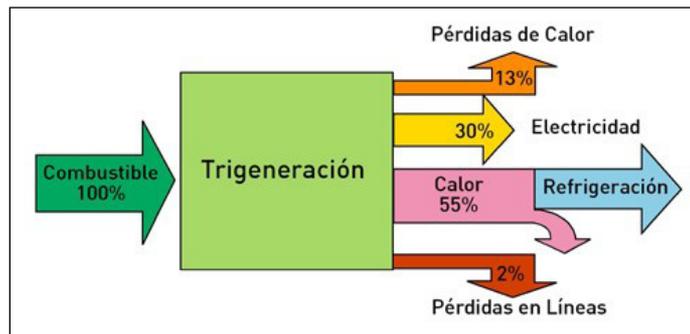


Figura 3. Flujos de energía en un sistema de trigeneración

La trigeneración es un sistema cuya principal aplicación se encuentra en el sector terciario, donde además de necesidades de calefacción y agua caliente se requieren importantes cantidades de frío para climatización, que consume una gran proporción de la demanda eléctrica. Se están desarrollando pequeños sistemas de absorción destinados al uso en bloques de viviendas e incluso sistemas unifamiliares si bien los costes de escalabilidad a pequeño tamaño hacen que no sean viables económicamente a día de hoy. En un edificio terciario típico la estacionalidad de estos consumos (calefacción en invierno y climatización en verano) impediría la normal operación de una planta de cogeneración clásica.

Las máquinas de absorción se aplican cuando existe una demanda de frío, que puede ser para algún proceso de fabricación en un caso industrial o para climatización en sector

edificatorio. La instalación de una máquina de absorción nos permite tener una curva de demanda térmica más homogénea a lo largo del año, permitiendo aumentar el tamaño de la instalación de cogeneración. En la Figura 4 se muestra el balance energético de un sistema de trigeneración para obtener una potencia frigorífica de 390 kW comprobándose que el consumo de energía primaria disminuye.

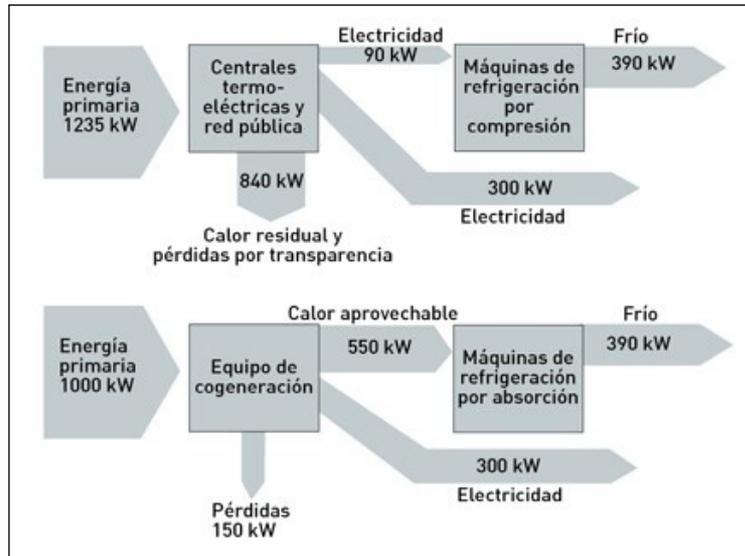


Figura 4. Balance energético trigeneración vs sistema convencional

Una **planta de trigeneración** está compuesta por una **planta de cogeneración** convencional a la que se le añade un **sistema de absorción** para la producción de frío.

Los sistemas típicos de cogeneración donde se integran máquinas de absorción para producción de frío son los que utilizan como sistema de producción de energía eléctrica motores alternativos o turbinas de gas, tanto en ciclo simple como combinado.

En la Figura 5 se muestra un esquema de un sistema de trigeneración.

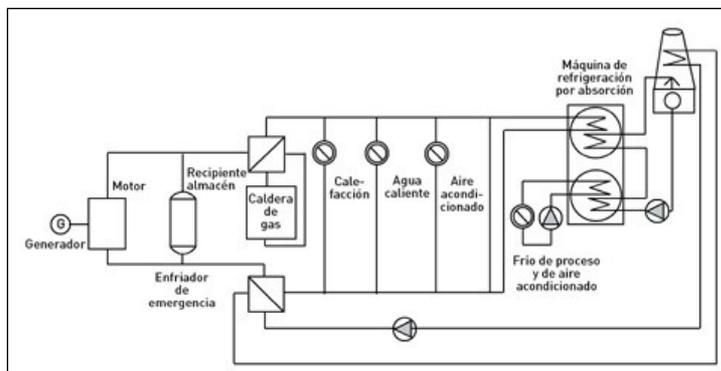


Figura 5. Sistema de trigeneración

1.2.1.1.1. *Sistemas de cogeneración-trigeneración basados en motor alternativo*

Los motores utilizados en sistemas de cogeneración y trigeneración son motores de combustión interna que generan energía mecánica a partir de la energía desprendida en la reacción de combustión de un combustible, generalmente gas natural, biogás o gases licuados del petróleo. El rango de potencias más usual de estos motores en sistemas de cogeneración en el sector industrial es de 100 kW a 1.000 kW y presentan un rendimiento que suele estar en torno al 30%-35% presentando además un amplio rango de funcionamiento.

Una característica muy importante es la relación entre la electricidad y el calor generado. En el caso de un motor alternativo la relación de energía calorífica frente a electricidad oscila entre 1,5 y 2, suponiendo por lo tanto que la potencia térmica generada es del orden del 60% o del 70%, siendo la generación eléctrica un 30%. En la Tabla 1 se muestran las principales características de los motores alternativos para cogeneración.

Tabla 1. Características de motores para cogeneración

Rango posible de potencias (kW)	15 - 3.000
Rango usual de potencias (kW)	100 - 1.000
Variación de carga	Elevada
Relación energía calorífica / eléctrica	1,5 - 2
Inversión	Reducida
Mantenimiento	No especializado
Vida útil (h)	20.000 - 60.000
Recuperación de calor	A 3 niveles: gases de escape, refrigeración del motor y aceite de lubricación
Nivel de temperatura útil	Refrigeración: <120 °C Gases de escape: 400 °C - 600 °C

El calor obtenido generalmente cuenta con dos niveles térmicos, en función de la procedencia del mismo. El calor se obtiene de la refrigeración del motor, la refrigeración del aceite de lubricación y de los gases de escape, Figura 6.

1.2.1.1.2. *Plantas de cogeneración con turbina de gas*

Las plantas de cogeneración con turbina de gas utilizan una turbina de gas como elemento de generación de energía mecánica y térmica, Figura 7. Su rendimiento de conversión es inferior al de los motores alternativos. Tienen la gran ventaja de presentar una fácil recuperación del calor ya que la energía térmica se encuentra concentrada en su práctica totalidad en los gases de escape. Al estar a una temperatura de unos 500 °C estos

gases son idóneos para producir vapor en un generador de recuperación dando lugar de este modo a un uso del calor de alta temperatura. Si este vapor se produce a la presión de utilización el ciclo se llama simple, mientras que si se genera a gran temperatura para generar energía eléctrica en una turbina de vapor recibe el nombre de ciclo combinado.

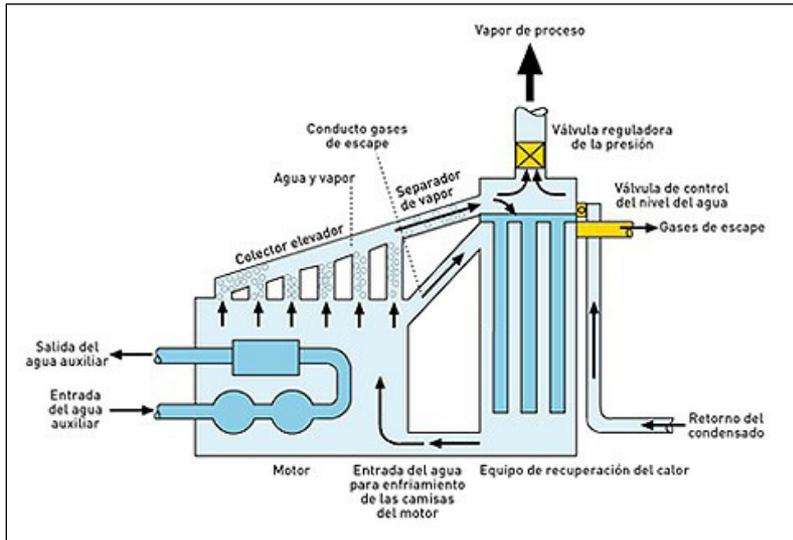


Figura 6. Obtención del calor en un motor de cogeneración

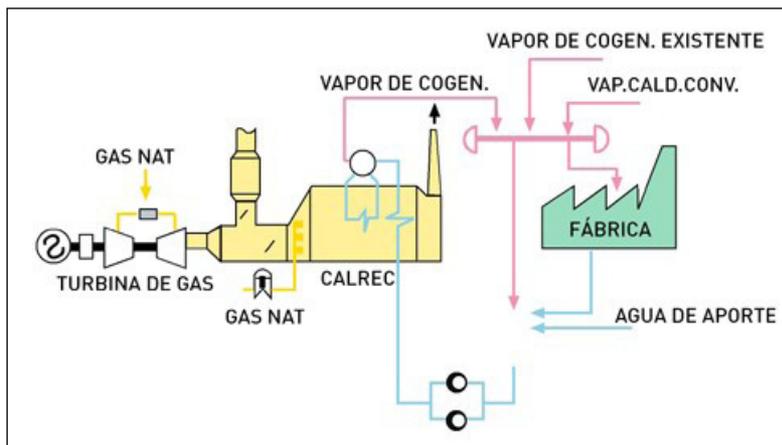


Figura 7. Cogeneración con turbina de gas

1.2.1.1.3. Máquinas de absorción

Las máquinas de absorción producen frío a partir de calor residual de algún proceso de fabricación o del calor obtenido en un motor o turbina para cogeneración. En general,

los sistemas de refrigeración consiguen producir el frío gracias a la evaporación de un fluido refrigerante (amoníaco, bromuro de litio o similar). Posteriormente, el fluido refrigerante es llevado a la situación inicial, comprimiéndolo y condensándolo, bien mediante una compresión mecánica (aire acondicionado) o bien mediante una compresión físico-química (máquina de absorción). El fluido refrigerante toma calor del cuerpo que se desea enfriar, al evaporarse a baja presión y temperatura, realizando un ciclo de absorción-desorción. El sistema de refrigeración por absorción es un medio de producir frío que, al igual que en el sistema de refrigeración por compresión, aprovecha que las sustancias absorben calor al cambiar de estado, de líquido a gaseoso. Así como en el sistema de compresión el ciclo se hace mediante un compresor, en el caso de la absorción, el ciclo se basa físicamente en la capacidad que tienen algunas sustancias, como el bromuro de litio, de absorber otra sustancia, tal como el agua, en fase de vapor. Otra posibilidad es emplear el agua como sustancia absorbente (disolvente) y amoníaco como sustancia absorbida (soluta). La técnica nació en 1859, cuando Ferdinand Carré consiguió fabricar hielo con la primera máquina de absorción de ciclo amoníaco-agua. El ciclo más comúnmente empleado es el de agua-bromuro de litio por tener mayor eficiencia. Se emplea el bromuro de litio porque tiene gran capacidad de absorber agua y porque puede deshidratarse mediante el calor.

Analizando en detalle este ciclo, el agua (refrigerante), que se mueve por un circuito a baja presión, se evapora en un intercambiador de calor llamado evaporador. La evaporación necesita calor, que obtiene en un intercambiador en el que refrigera un fluido secundario (normalmente, también agua), que se lleva por una red de tuberías a enfriar los ambientes o cámaras que interese. Tras el evaporador, el bromuro de litio absorbe el vapor de agua en el absorbedor, produciendo una solución diluida o débil de bromuro en agua. Esta solución pasa al generador, donde se separan disolvente y soluto mediante calor procedente de una fuente externa; el agua va al condensador, que es otro intercambiador donde cede la mayor parte del calor recibido en el generador, y desde allí pasa de nuevo al evaporador a través de la válvula de expansión; el bromuro, ahora como solución concentrada en agua, vuelve al absorbedor para reiniciar el ciclo.

También se suele utilizar un intercambiador de calor, poniendo en contacto, sin mezcla, los conductos absorbedor-generador y generador-absorbedor, para precalentar la solución de agua-bromuro de litio, antes de pasar al calentador (generador), mientras que, a su vez, la solución concentrada de bromuro de litio se enfría cuando va hacia el absorbedor, ya que la absorción se realiza mejor a baja temperatura. En el absorbedor debe haber un intercambiador para enfriarlo con la torre de enfriamiento u otro sistema de disipación de calor. Al igual que en el ciclo de compresión, el sistema requiere un sistema de disipación térmica (por ejemplo una torre de enfriamiento) para disipar el calor sobrante (suma del aportado por la fuente externa y el extraído de los espacios refrigerados). El fluido caloportador que va a la torre discurrirá sucesivamente por dos intercambiadores situados en el absorbedor y en el condensador. Como se puede ver en la Figura 8, los únicos elementos mecánicos existentes en el ciclo son una bomba que lleva la solución con-

centrada al generador y otra, no representada, para llevar el caloportador a la torre de enfriamiento. El ciclo amoniaco-agua es en todo semejante, salvo que en este caso el refrigerante es el amoniaco y el absorbente es el agua. Se utiliza, aunque tiene menor eficiencia energética, porque tiene la ventaja de poder conseguir temperaturas inferiores a 0 °C, es decir, en aparatos para congelar, como frigoríficos.

Las máquinas de absorción tienen como principal ventaja que pueden ser combinadas con sistemas de cogeneración, actuando como consumidores térmicos que permiten obtener agua y/o aire de refrigeración a una temperatura de entre 5,5 °C y 7 °C. Esto permite que el lugar de instalación pueda ahorrar mucha energía primaria y reducir los costes operativos al generar su propio autoconsumo de electricidad, calor y frío. En la Figura 8 se muestra el esquema de una máquina de absorción.

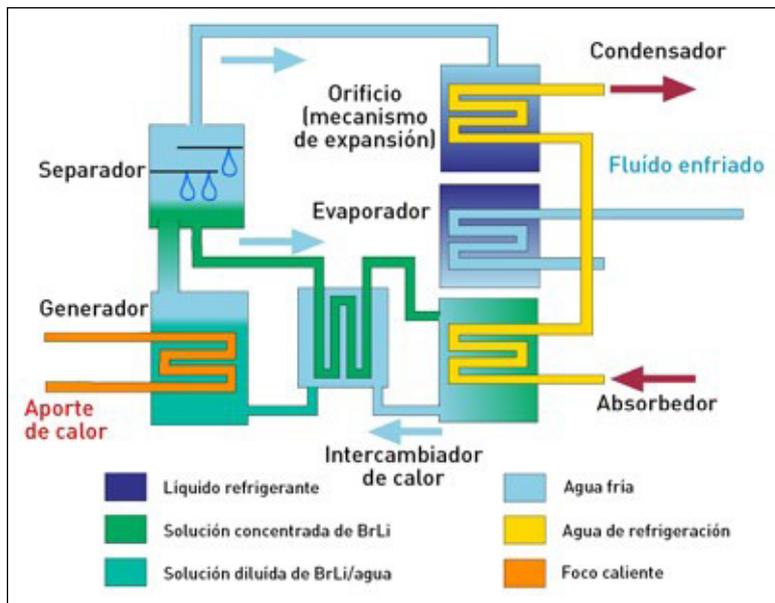


Figura 8. Máquina de absorción

1.2.1.1.4. Ventajas y desventajas de la tecnología de cogeneración y trigeneración

Las **principales ventajas** derivadas del uso de la tecnología de cogeneración o trigeneración son:

- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (herramienta para el cumplimiento del Protocolo de Kyoto).
- Disminución de pérdidas en el sistema eléctrico e inversiones en transporte y distribución.
- Aumento de la competitividad industrial.