



CONSTRUIMOS FUTURO

RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS

Camilo Táutiva Mancera

Especialización en Sistemas de Distribución de Energía
Eléctrica

21 de febrero de 2015

Contenido de la presentación



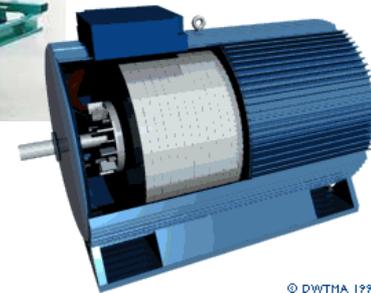
- Tipos de generadores
- Impactos técnicos
- Análisis técnicos con generación distribuida
 - Flujos de potencia
 - Cambio en los flujos de potencia
 - Análisis de cortocircuito
 - Efectos a nivel de transmisión
 - Efectos en calidad de la potencia eléctrica
 - Otros estudios
- Planeamiento de la expansión con GD

TIPOS DE GENERADORES

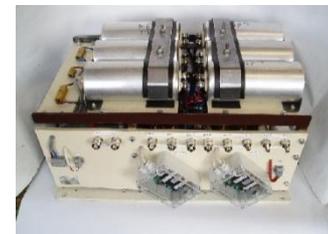
Tipos de generadores para GD



- Máquinas eléctricas convencionales
 - Generadores sincrónicos
 - Generadores (máquinas) de inducción
 - Proveen grandes torques de amortiguamiento y se usan en turbinas eólicas de velocidad fija
- Circuitos convertidores de electrónica de potencia
 - Energía producida en forma DC → fotovoltaica, celdas de combustible



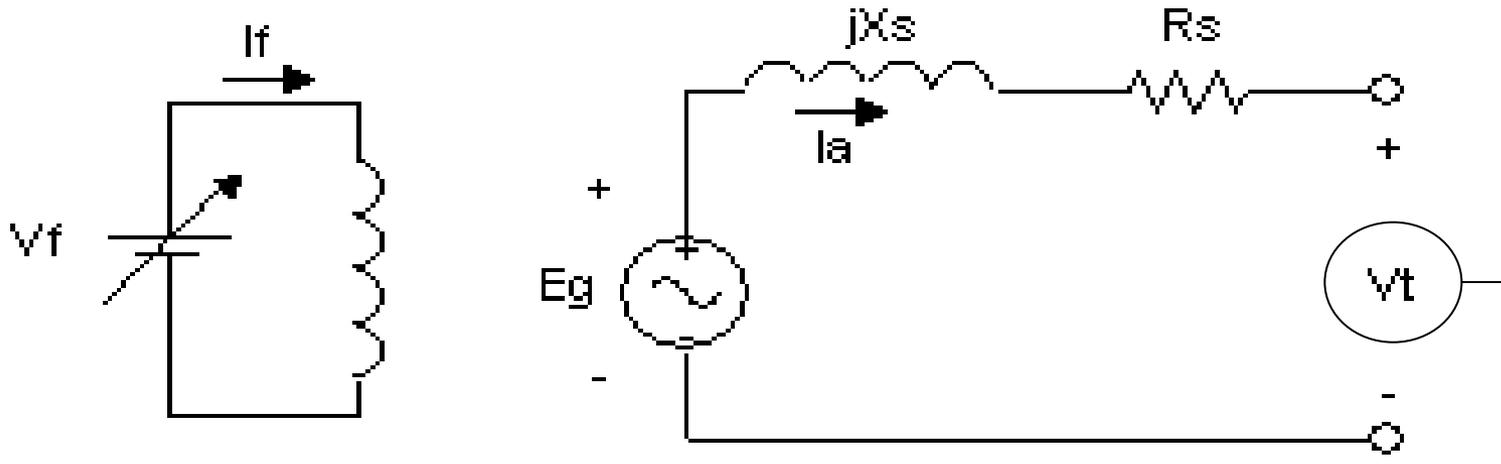
© DWTHA 1998



Generador Sincrónico

- Embobinado de campo → rotor
 - Excitación DC
 - Nuevos desarrollos con magnetos permanentes
 - Rotor cilíndrico en térmicas y de polos salientes en hidráulicas
- Embobinado de armadura → estator
 - Experimenta un FMM rotando a una velocidad proporcional a la frecuencia de suministro

Generador Sincrónico – Circuito equivalente



Nota $E_f = E_g$

$$V_t = E_f - Z \times I_a$$

$$Z = R_s + jX_s$$

X_s reactancia sincrónica

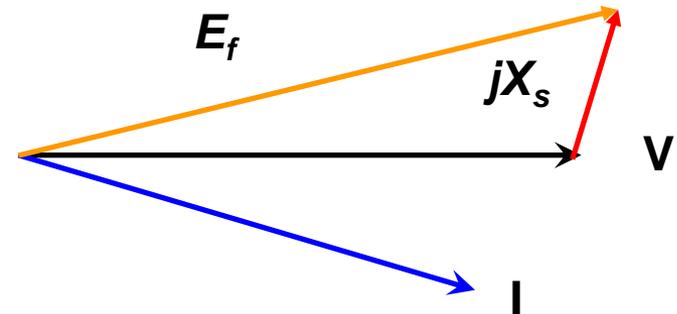
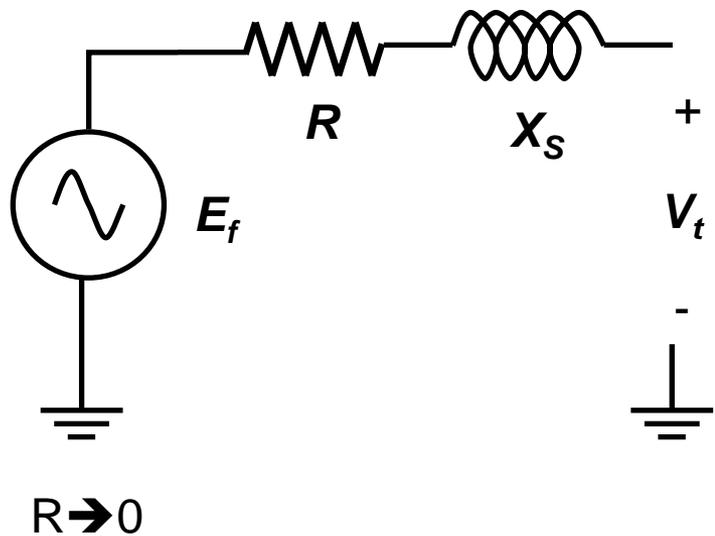
Para pequeños generadores embebidos, el voltaje terminal es mantenido casi constante por la red.

Fuente: M. Torres, "Notas de Clase Fundamentos de Sistemas de Potencia", Universidad de Los Andes, 2004

Generador Sincrónico – Operación del generador



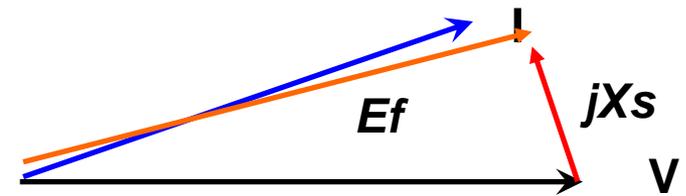
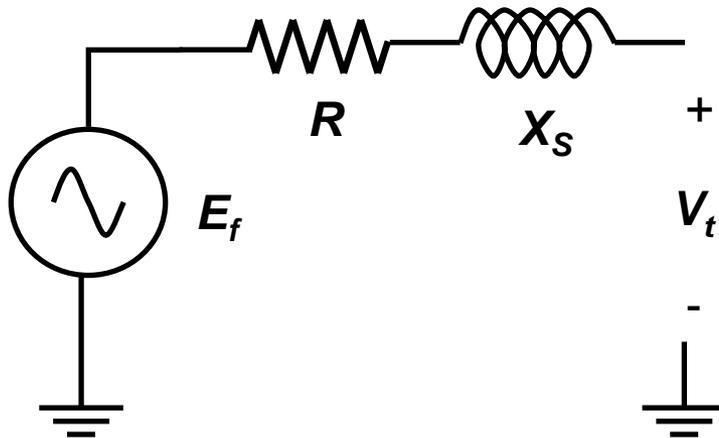
- Operación sobre excitada ($|E_f| > |V_t|$)
 - Factor de potencia de la carga en atraso



Generador Sincrónico – Operación del generador



- Operación sub Excitada ($|E_f| < |V_t|$)
 - Factor de potencia de la carga en adelanto



$R \rightarrow 0$

Generador Sincrónico – Control de generación



- La potencia activa es variada ajustando el torque aplicado al eje del generador.
 - Un generador embebido (pequeño) no puede afectar la frecuencia de operación del sistema → modelo de barra infinita.
- La potencia reactiva es ajustada variando la corriente de campo (DC) y en consecuencia el voltaje interno E_f .

Generador Sincrónico – Control de generación



- Los controles convencionales LFC (frecuencia) y del AVR (voltaje terminal) NO son apropiados para generadores embebidos.
 - Generalmente, requieren mantener un intercambio constante de potencia independiente de la frecuencia.
 - Operación con intercambio mínimo de Q puede ser deseado por el GD.

Generador Sincrónico – Control de generación

- El control en GD es con base en P y Q y no en F y V_t .
 - El control de F y V_t lo realiza la red (SisPot)
- El desempeño del generador es fuertemente influenciado por el sistema de excitación en estabilidad transiente y dinámica, y en la habilidad de entregar corriente de falla sostenida.
 - Importancia de la I_{falla} en GD debido a la relativa pequeña potencia relativa de la máquina y a los largos tiempos de eliminación de fallas en sistemas de distribución.

Generador Sincrónico – Control de generación



- Especial atención se requiere en el diseño de GD para proveer corriente de falla !!!
- Sistemas de excitación:
 - Escobillas o estático.
 - Autoexcitado (tomando potencia de la red) o magnetos permanentes.
 - Los magnetos permanentes mantienen el voltaje de excitación siempre y, por tanto, sostienen la corriente de coci.
 - El AVR es controlado por el factor de potencia o por un Q específico.

Generador Sincrónico – Control de generación

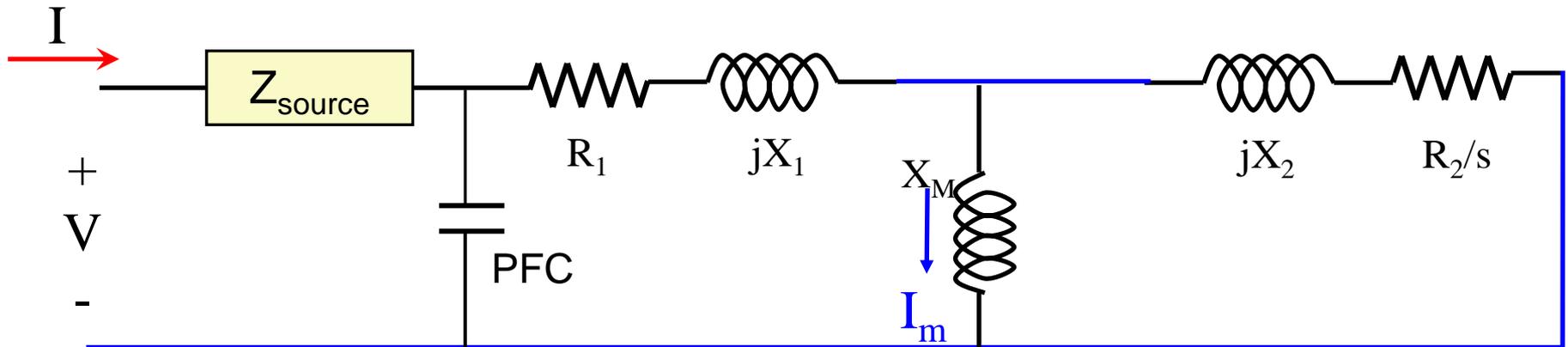
- En condiciones de perturbaciones (fallas) en algunos generadores la respuesta del AVR tiene el efecto de reducir el amortiguamiento del generador (puede llevar a inestabilidad); condición NO DESEABLE en GD.
- Debido a las constantes de tiempo de $coci$ (transitoria y subtransitoria) y dependiendo del diseño del GD se requiere una corriente de falla sostenida de 3 p.u. para un $coci$ en los bornes terminales del GD, lo que puede requerir un voltaje interno de 8 o 10 veces el necesario para condición sin carga.

Generador de Inducción



- La mayoría de los GD de inducción son del tipo “jaula de ardilla”, pocos embobinados; debido a
 - Las características de amortiguamiento
 - Simplicidad de construcción y robustez de la máquina
- Se encuentran en todas las turbinas eólicas de velocidad fija.
- Los generadores de inducción se diferencian de los sincrónicos en que siempre conservan una relación entre P y Q (diagrama circular).
 - En ocasiones requieren compensación capacitiva para conservar el factor de potencia.

Generador de Inducción – Circuito equivalente



- PFC: “power factor corrector”
- Ej: Generador de 10 MVA requiere PFC de 2 MVar
- Problema del GI: se llega a la inestabilidad cuando el GD no es capaz de transmitir el torque aplicado al eje (por las turbinas eólicas); pudiendo ocasionar un colapso de voltaje o un disparo de los generadores por sobre-velocidad o bajo voltaje.

Generador de Inducción – Conexión



- Conexión a la Red
 - Al conectar el GI a la red hay una magnetización in-rush transitoria seguida de una transferencia de potencia.
 - Las corrientes de arranque en GI grandes son elevadas e inaceptables para el sistema de potencia.
 - Arranque suave para controlar transitorios de flujos de potencia y corrientes in-rush.
 - “Back-to-back thyristors”

Generador de Inducción – Conexión



- El control del factor de potencia de salida solo se logra adicionando EQUIPOS EXTERNOS (PFC)
- Si los PFC suministran la Q requerida por el generador → si se pierde la conexión a la red, el generador continua desarrollando un V .
 - Condición indeseable en el GI, por aceleración
 - Fenómeno conocido como “auto-excitación”, causa de daños de equipos de carga aislados de la red y conectados al GI

Generador de Inducción – Operación



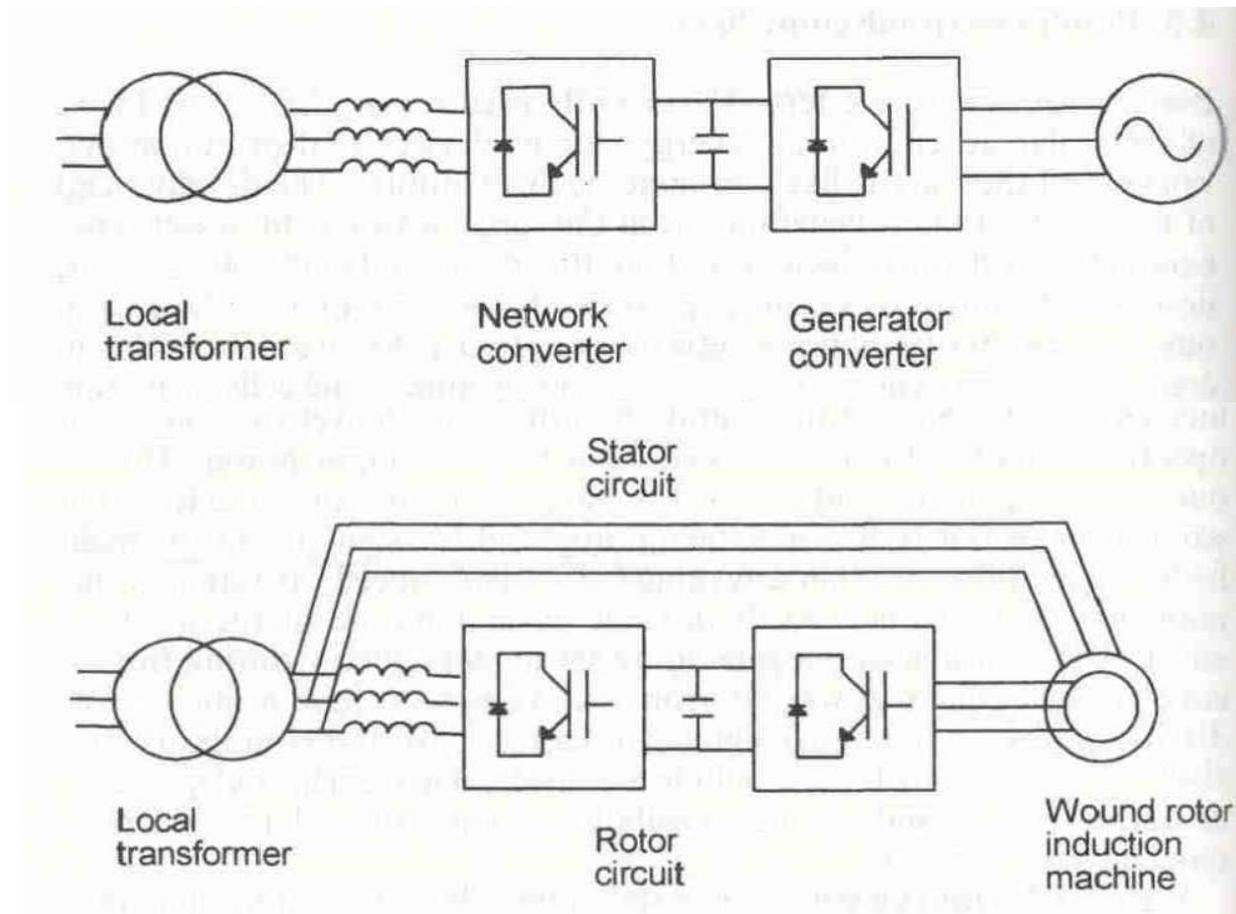
- Operación bajo perturbaciones
 - GI con bajas impedancias en voltajes desbalanceados, produciendo corrientes grandes si no hay balance de voltajes en el SisDis.
 - Una falla trifásica interrumpe el suministro de Q necesaria para mantener la excitación del GI, así no hay contribución sostenida en falla simétrica.
 - En falla desbalanceada, hay contribución sostenida a la falla elevando la corriente en las fases no falladas.

Convertidores de electrónica de potencia



- Son utilizados actualmente para conectar algunas tecnologías de generación y almacenamiento (fotovoltaicas, celdas de combustible, baterías, etc.) a la red de distribución.
- También se utilizan para conectar generadores de velocidad variable (turbinas eólicas, pequeñas hidro).
- Presentan ventajas en cuanto a la eficiencia en la utilización de este tipo de tecnologías de generación.
- Presentan desventajas en cuanto a su complejidad y sus costos, pérdidas, y la posible inyección de corrientes armónicas en la red.

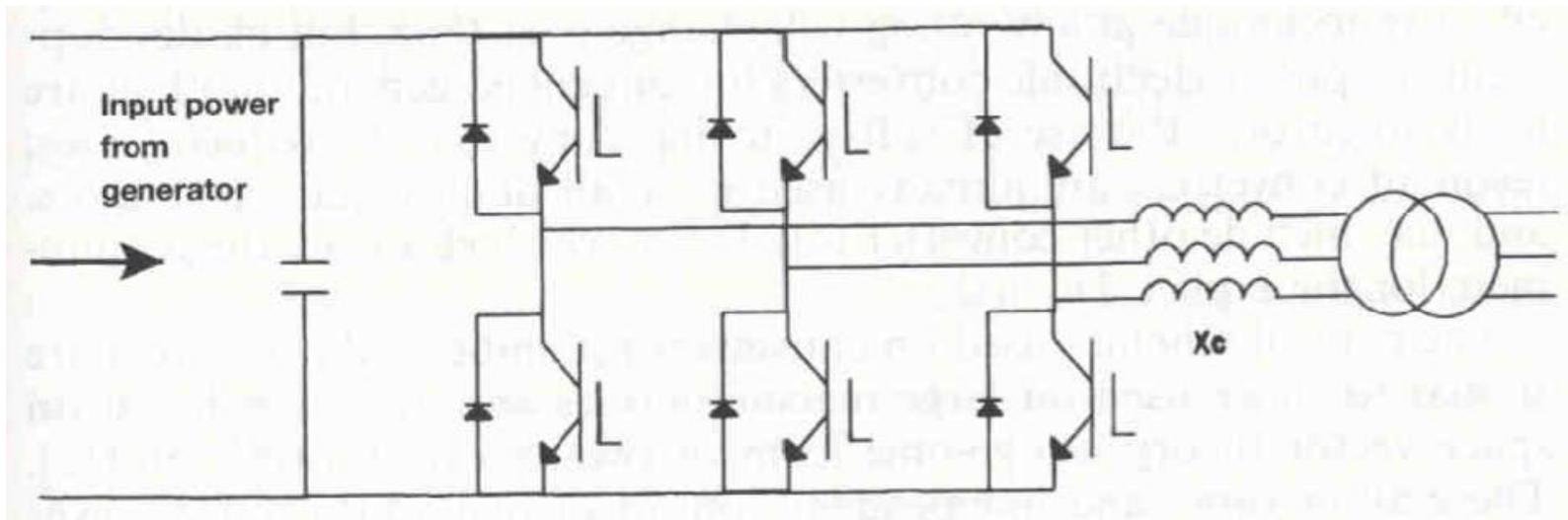
Convertidores de electrónica de potencia



Convertidores de electrónica de potencia



CONSTRUIMOS FUTURO



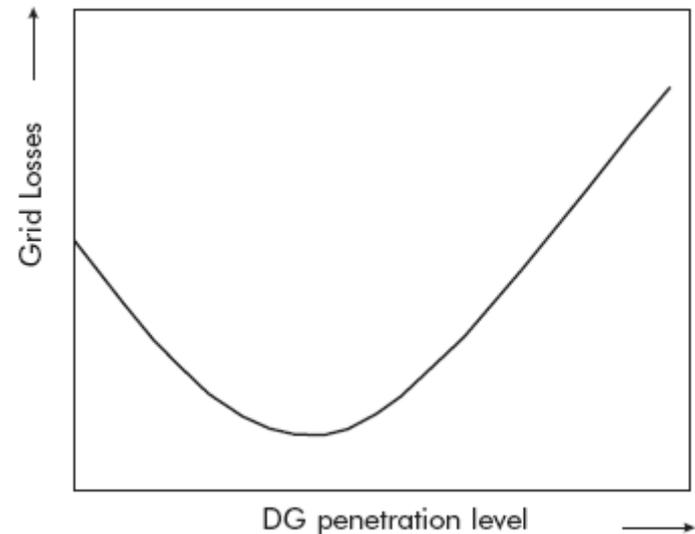
IMPACTOS TÉCNICOS

Impactos técnicos de la GD

- La GD tiene impactos en el diseño y en la operación de los sistemas de potencia, especialmente, al nivel de distribución.
- La GD puede afectar
 - Dirección y magnitud del flujo de potencia
 - Perfil de voltaje
 - Estabilidad de voltaje
 - Selectividad de las protecciones
 - Calidad de la potencia, tanto para usuarios como para el operador de la red
 - Confiabilidad del suministro (respaldo)

Impactos técnicos de la GD *66 Años*

- GD altera los flujos en la red → altera las pérdidas eléctricas
 - Las pérdidas eléctricas pueden aumentarse o reducirse dependiendo del nivel de penetración y de dispersión



Fuente: Jenkins, 2000

Impactos técnicos de la GD

- Elevación del voltaje de la red (MT)
 - Presencia de sobrevoltajes en función de la potencia inyectada, del factor de potencia, de la localización del generador y de la red.
 - Al conectar un GD al final de la red de MT → el flujo de corriente se invierte → mejora el perfil de voltaje

Impactos técnicos de la GD



- Dependiendo de las circunstancias, la GD aumenta o disminuye la calidad del voltaje debido a variaciones transitorias del mismo.
 - La variabilidad de la velocidad del viento o de la radiación solar resultan en salidas de funcionamiento y en fluctuaciones de voltaje.
 - El “flicker” puede resultar de rápidas variaciones de la potencia de salida del generador o de los arranques de las máquinas.

Impactos técnicos de la GD



- GD con interfaces de electrónica de potencia para conectar a la red puede provocar distorsiones armónicas.
 - Dependencia de la tecnología de conversión

Impactos técnicos de la GD



- Incremento de los niveles de co-ci
- Protecciones
 - La integración de la GD puede interferir con los esquemas existentes de protecciones de la red de distribución, dado que estos se han diseñado en forma unidireccional.
 - Pueden generarse conflictos operacionales relacionados con las protecciones de sobrecorriente, recierres instantáneos, ferroresonancia.

Impactos técnicos de la GD

- Protección de la red
 - Mayor dificultad
 - Generadores de inducción no pueden sostener corriente 3ϕ de coci y su contribución a fallas asimétricas es limitada
 - Pequeños generadores sincrónicos requieren sofisticados sistemas de excitación para sostener I de coci
 - Formación de islas atendidas por GD
 - A veces se requiere desconectar el GD por seguridad para cuando se restaure la red principal
 - Cuando se permite funcionar en isla se conoce como “Micro-Redes”

Impactos técnicos de la GD

- Estabilidad
 - Si el GD es proveedor de la energía, perturbaciones transitorias pueden desconectar el generador
 - Si el GD provee soporte (“back up”) la estabilidad transitoria es muy relevante
- GD altera flujos en la red de T&D
 - Reduce pérdidas
 - Reduce la cargabilidad de la red de Transmisión
- Reducción en la generación despachada en forma central

ANÁLISIS TÉCNICOS CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Tipo de estudios

- **Objetivos en el diseño de sistemas de distribución**
 - Suministrar energía eléctrica con niveles aceptables de calidad en condiciones normales de operación
 - Proteger la integridad del sistema cuando la red está afectada por fallas
- **Estudios típicos**
 - Flujo de carga
 - Corto circuito
 - Estabilidad
 - Transitorios electromagnéticos

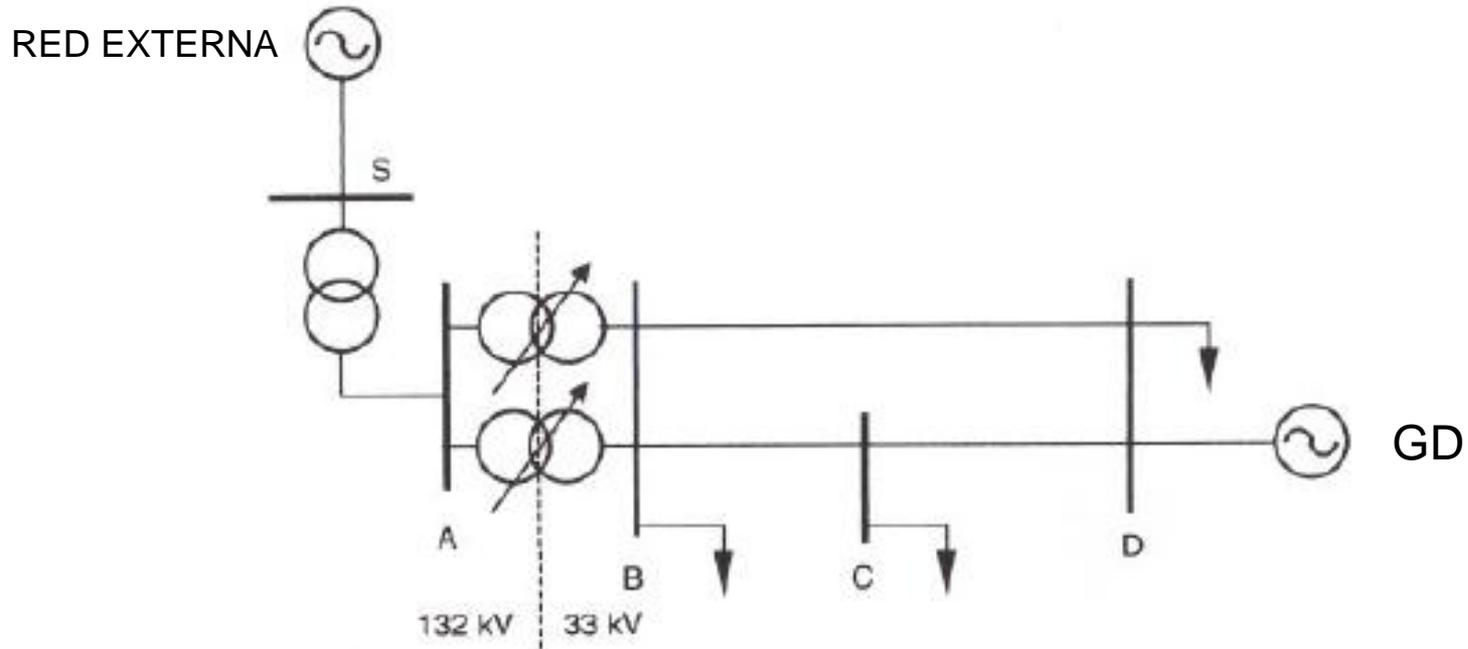
} Estado estable de equilibrio (normal o en falla)

} Estado transitorio

Flujo de carga

- Características de solución del problema
 - Sistema radial
 - Una sola fuente de potencia (nodo “slack”)
 - Flujo de carga radial
- Sistema de distribución con GD
 - Hay fuentes adicionales de potencia
 - ¿Unidireccional?

Ejemplo – Efecto GD en flujo de potencia*

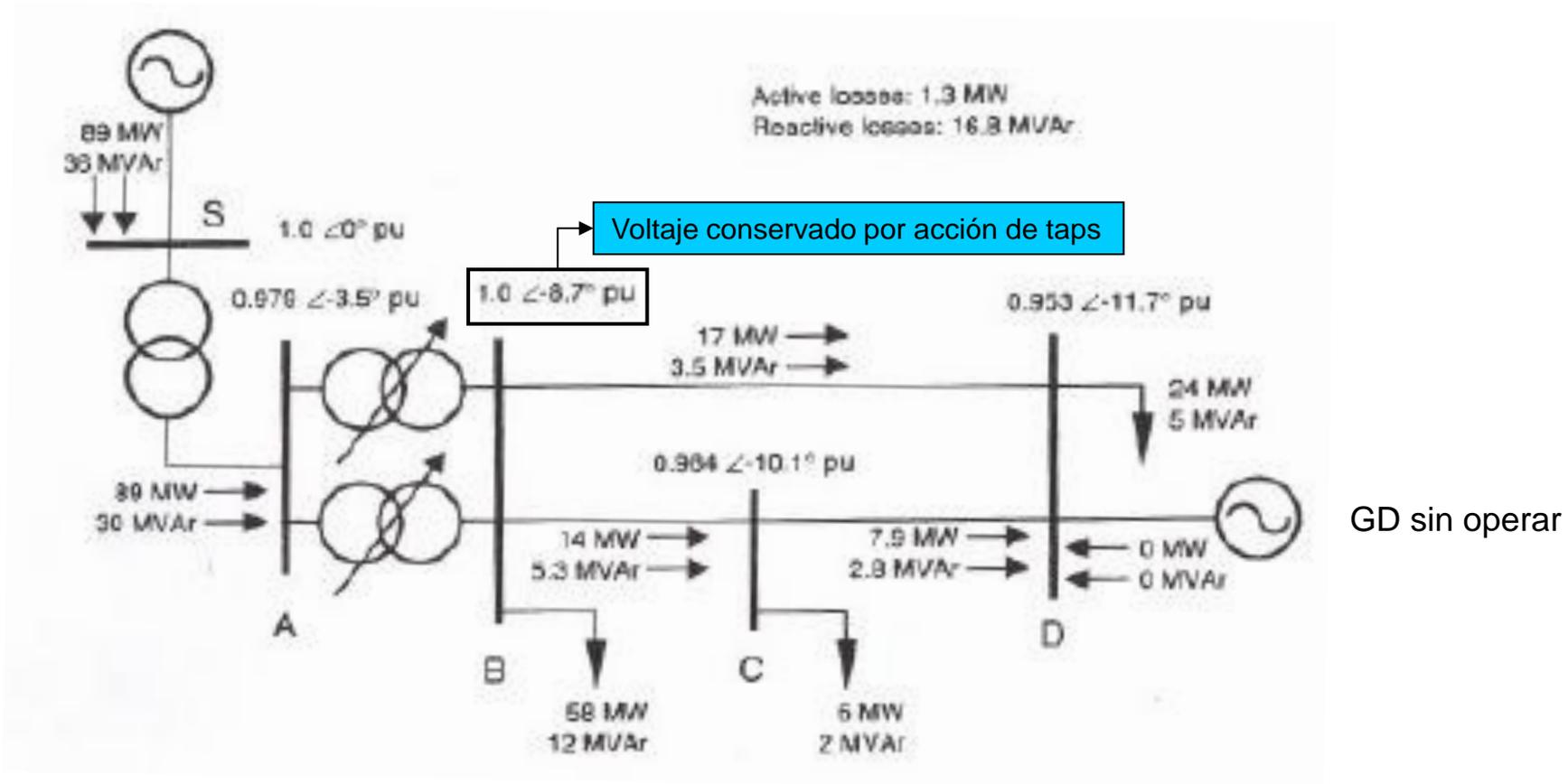


* Fuente: N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, G. Strbac, "Embedded Generation", IEE Power and Energy Series 31, 2000, Reino Unido

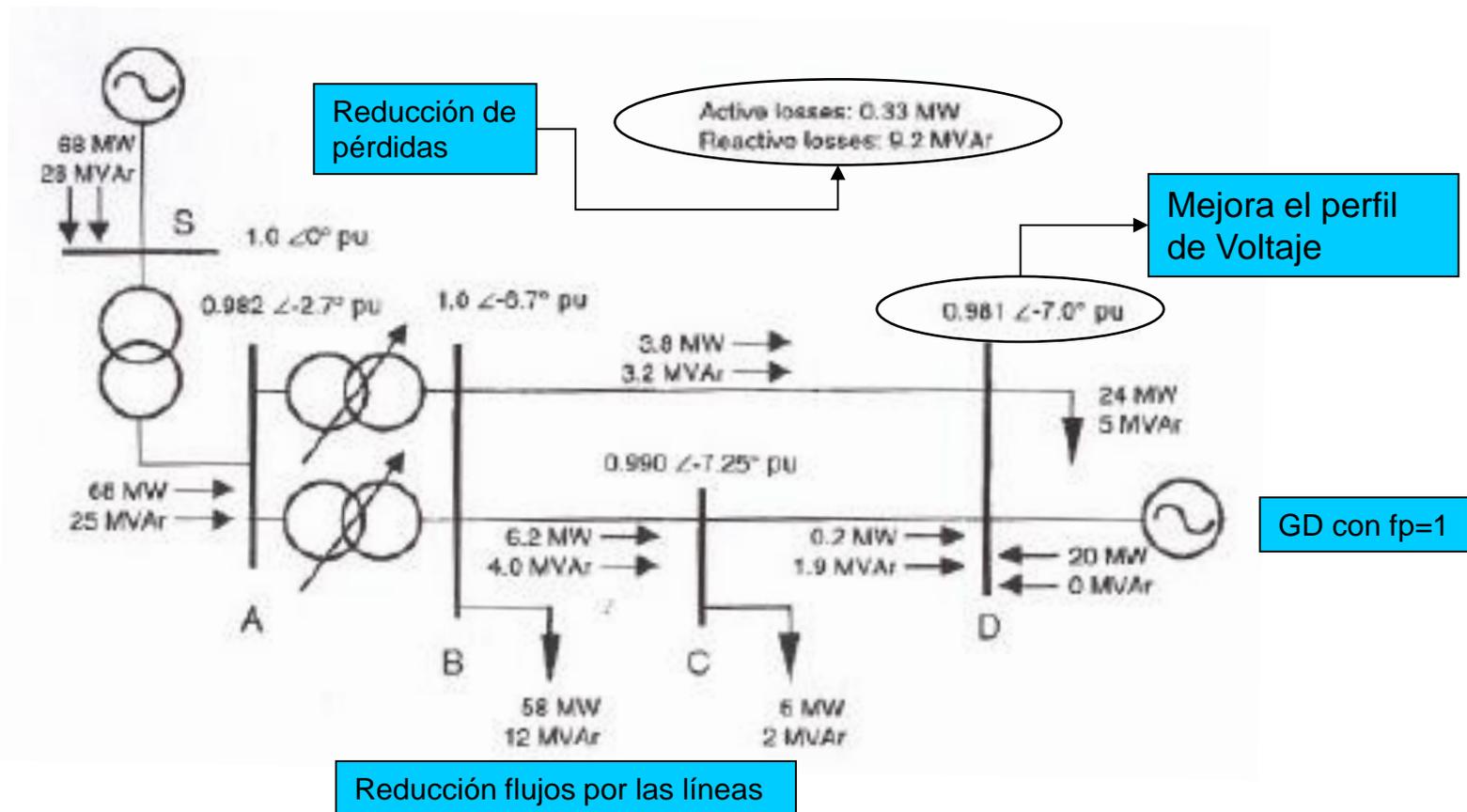
Ejemplo – Efecto GD en flujo de potencia



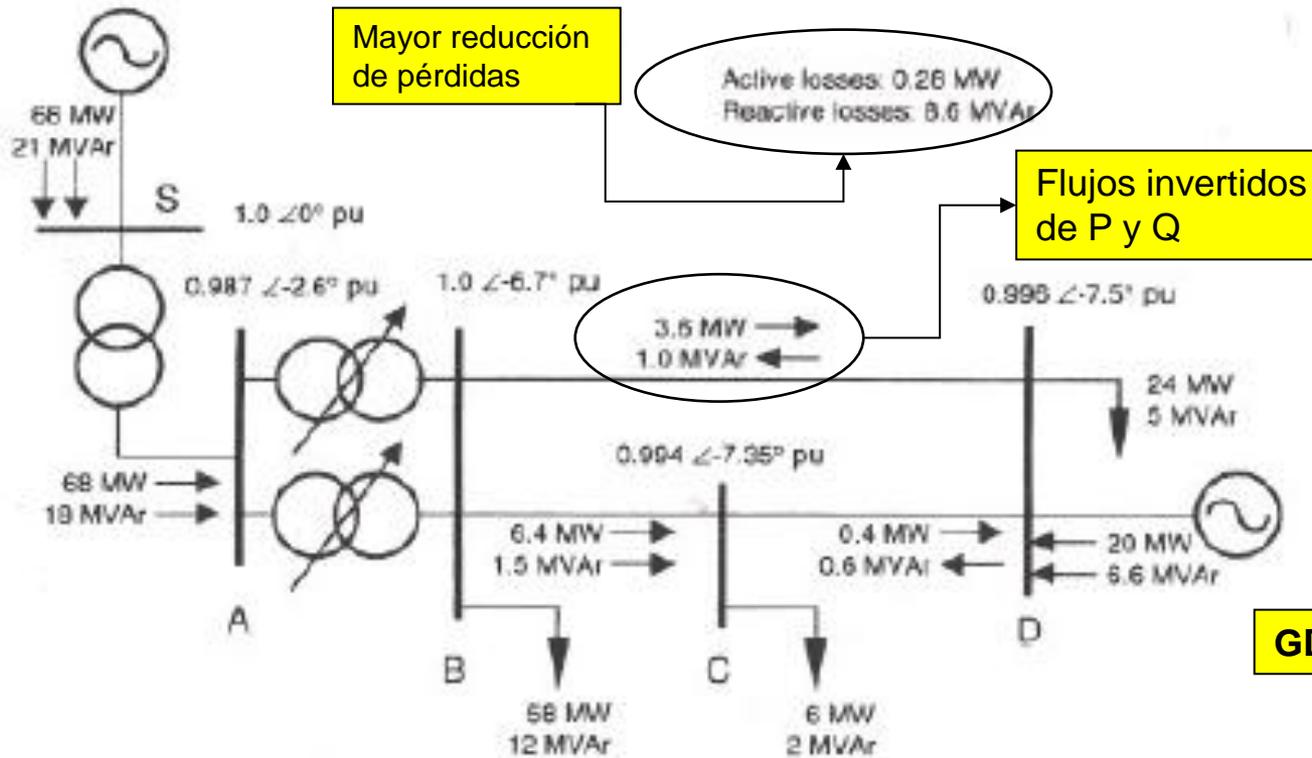
CONSTRUIAMOS FUTURO



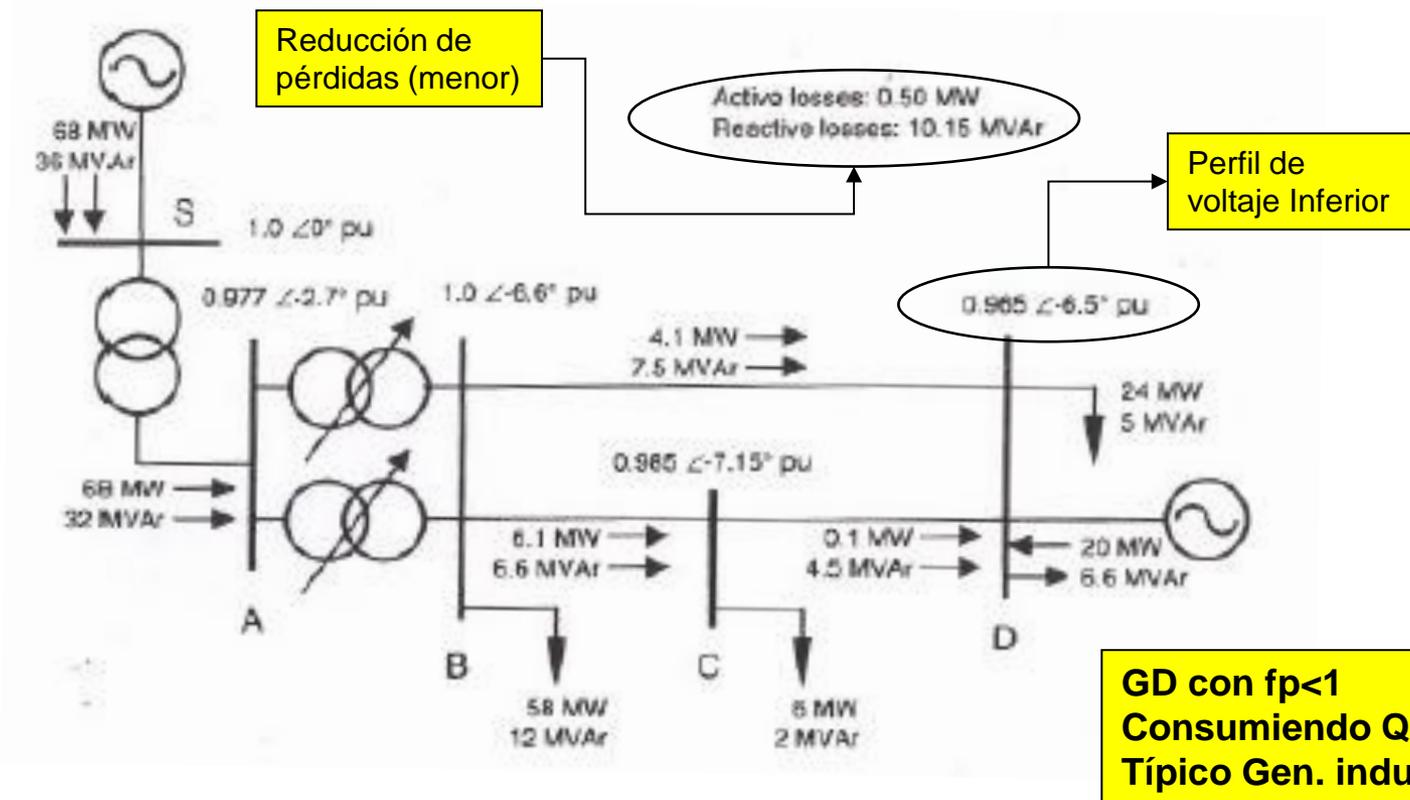
Ejemplo – Efecto GD en flujo de potencia



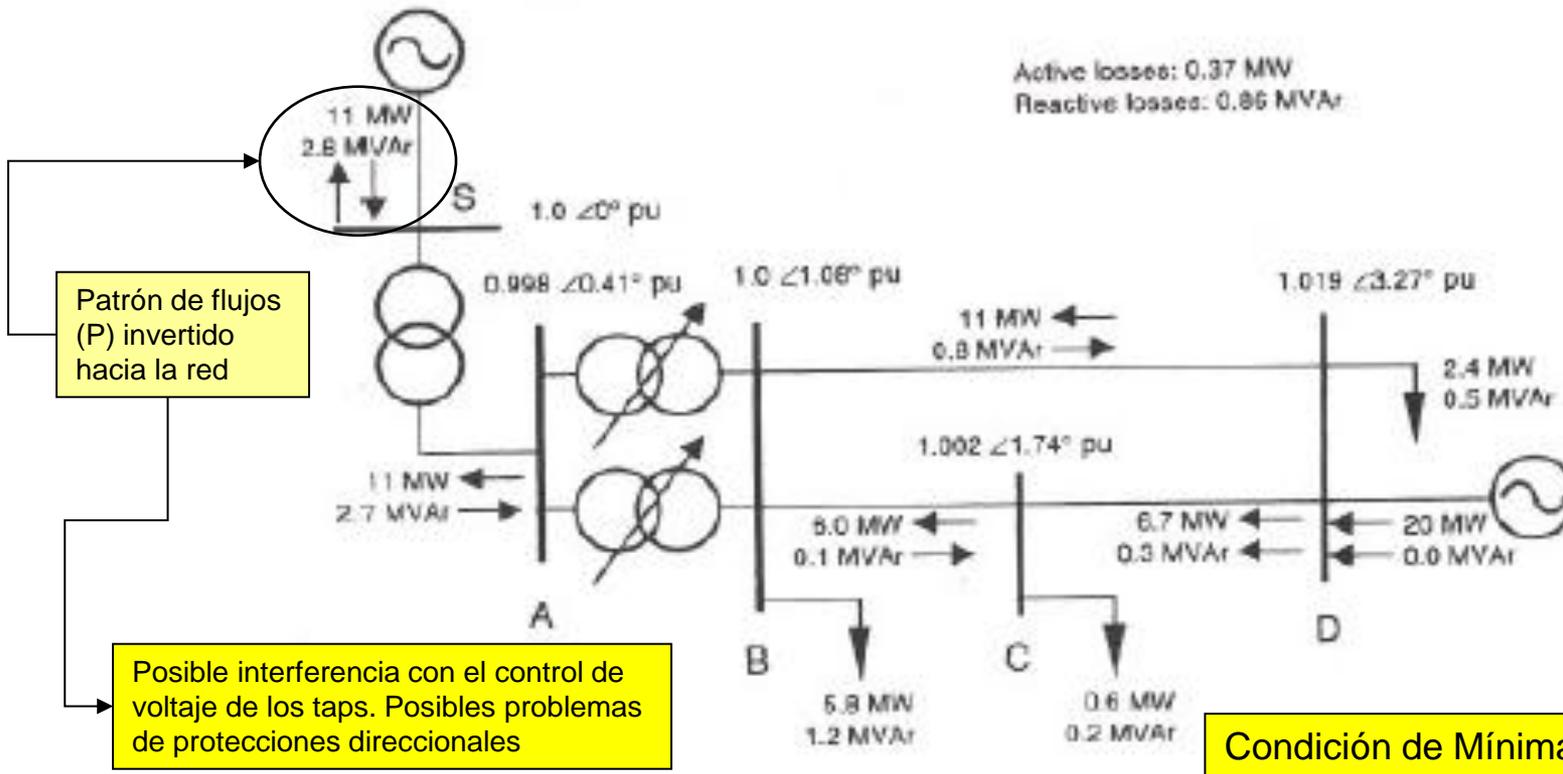
Ejemplo – Efecto GD en flujo de potencia



Ejemplo – Efecto GD en flujo de potencia



Ejemplo – Efecto GD en flujo de potencia



Corto circuito

- Predecir las corrientes durante diferentes tipos de falla es muy importante por dos razones, principalmente:
 - La corriente puede ser muy alta y puede dañar los equipos expuestos a ella, o exceder la capacidad de los equipos que la deben interrumpir
 - La corriente puede ser muy pequeña para que la falla sea detectada
- Diseñar un esquema de protección capaz de discriminar entre una corriente grande (pero normal) y una corriente pequeña de falla es difícil
- Fallas simétricas y asimétricas requieren análisis diferenciados

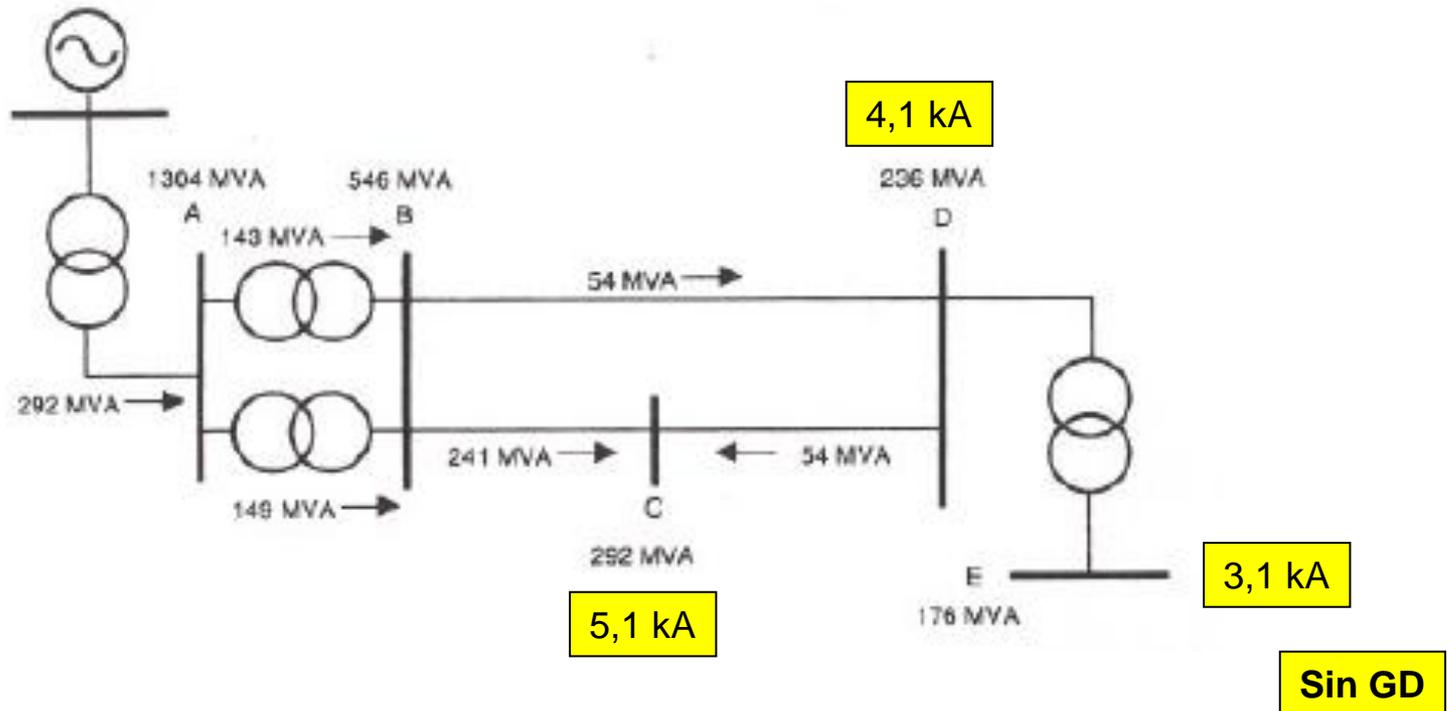
Corto circuito

- Las corrientes de corto circuito en sistemas de distribución dependen de la distancia eléctrica a las fuentes.
- La presencia de un generador embebido incrementa significativamente los niveles de cortocircuito

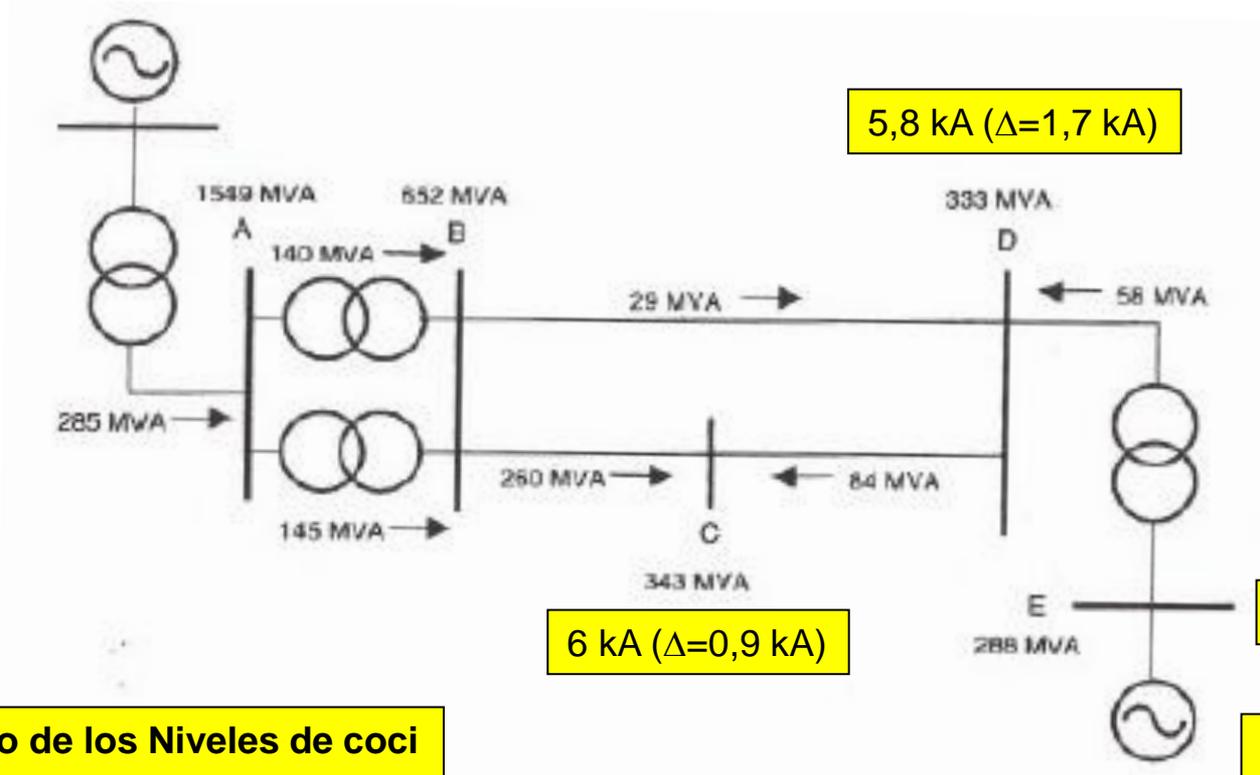
$$FL = \sqrt{3}V_{Nom}I_f \quad (MVA)$$

$$FL^{PU} = \frac{FL}{S_{base}} = I^{PU} = \frac{1}{|Z_{Th}^{PU}|}$$

Ejemplo – Efecto GD en corto circuito balanceado



Ejemplo – Efecto GD en corto circuito balanceado

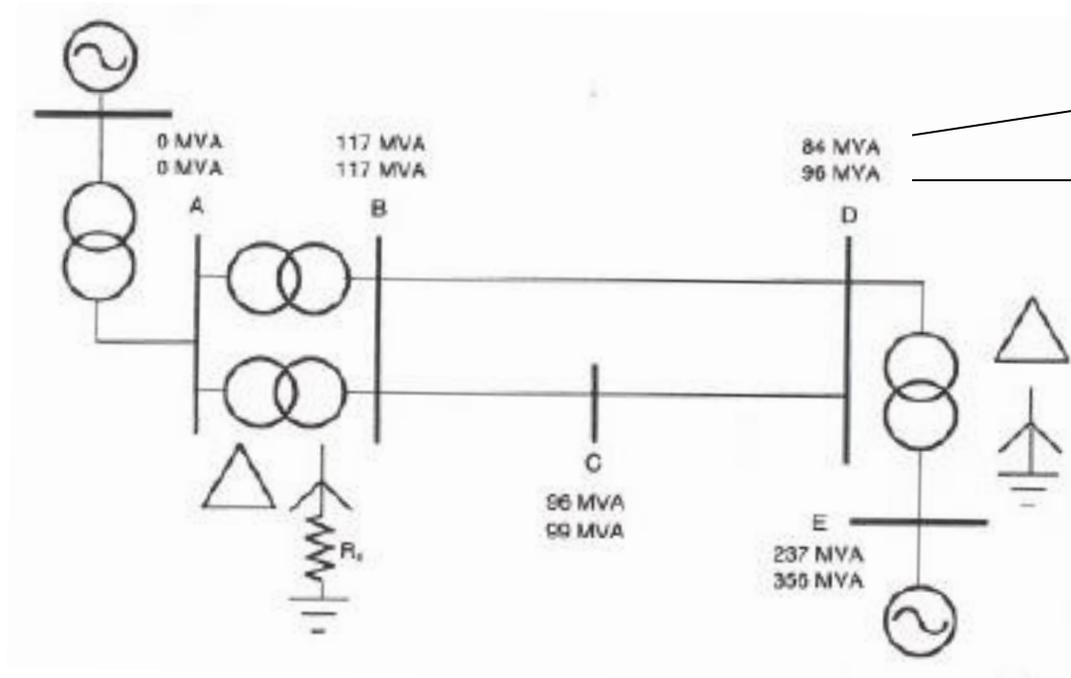


Ejemplo – Efecto GD en corto circuito desbalanceado



- La presencia de un generador embebido en el sistema de distribución **NO** incrementa significativamente los niveles de cortocircuito
- Excepción → nodos de conexión del GD

Ejemplo – Efecto GD en corto circuito desbalanceado



Sin GD

Con GD

Influencia de la GD en la calidad de energía

- El producto que recibe el usuario final es la onda de tensión.
- La calidad del producto la conforman todas aquellas perturbaciones que afectan las características más fundamentales de la onda de tensión:
 - Frecuencia
 - Amplitud
 - Forma de onda
 - Simetría del sistema trifásico

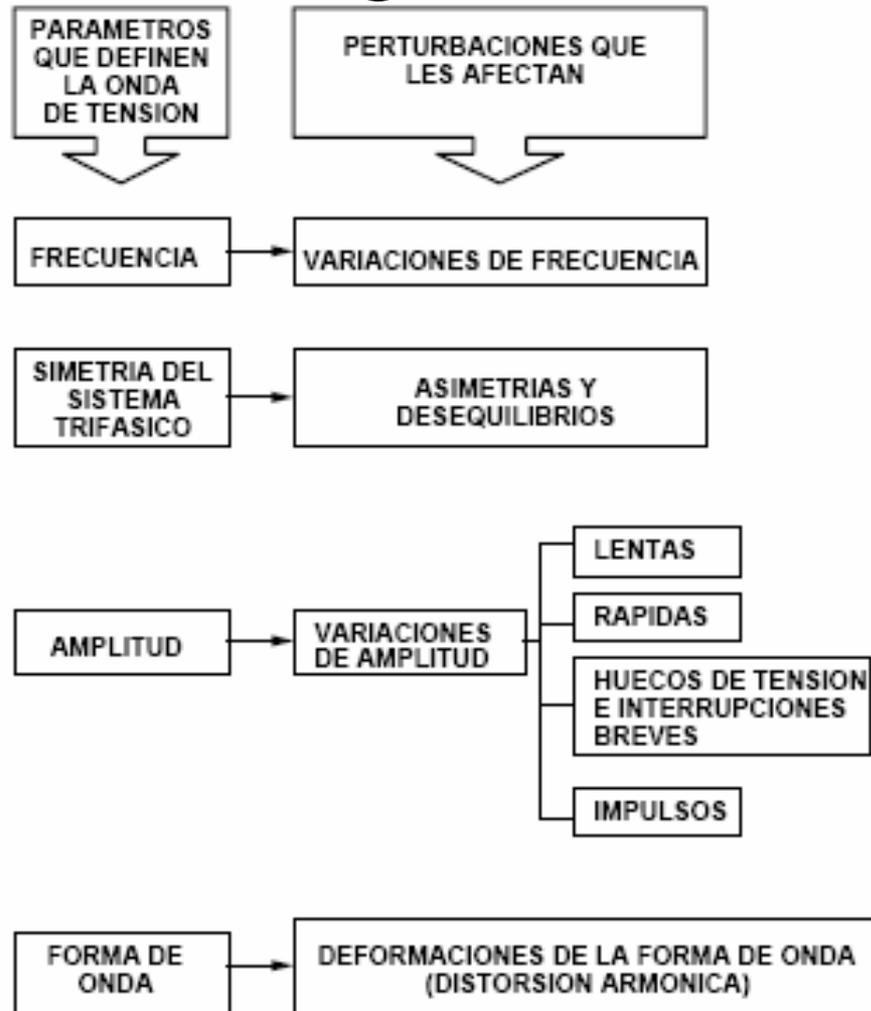
Influencia de la GD en la calidad de energía

- Fenómenos o perturbaciones más características:
 - Variaciones de frecuencia
 - Armónicos
 - Flicker (variaciones rápidas y lentas de tensión)
 - Fluctuaciones de tensión
 - Huecos e interrupciones breves
 - Impulsos
 - Sobretensiones transitorias
 - Desequilibrios y asimetrías

Influencia de la GD en la calidad de energía



CONSTRUIMOS FUTURO



Influencia de la GD en la calidad de energía

- Perturbaciones correspondientes a alteraciones de las características de la onda de tensión
 - Frecuencia
 - Variaciones de frecuencia: respecto a la nominal de 60 Hz
 - Forma de onda
 - Distorsión armónica: deformación de la onda senoidal que puede ser descompuesta en ondas senoidales, 60 Hz (componente fundamental) y otras frecuencias armónicas (múltiplos de 60 Hz).
 - Simetría del sistema trifásico
 - Desequilibrios y asimetrías: desigualdades de módulos en las fases y/o sus desfases relativos en el sistema trifásico considerado

Influencia de la GD en la calidad de energía

- Amplitud
 - Variaciones lentas de tensión:
 - Variaciones de la tensión de servicio respecto a la tensión nominal.
 - Durante un tiempo superiores a 10s.
 - Variaciones rápidas de tensión:
 - Variaciones del valor eficaz de la tensión (hasta el 10%) entre dos niveles contiguos.
 - Manteniendose cada uno de ellos durante un tiempo superior a 30 ms.
 - Aparecen de manera esporádica como repetitiva y de forma regular.
 - Fenómeno del flicker.

Influencia de la GD en la calidad de energía

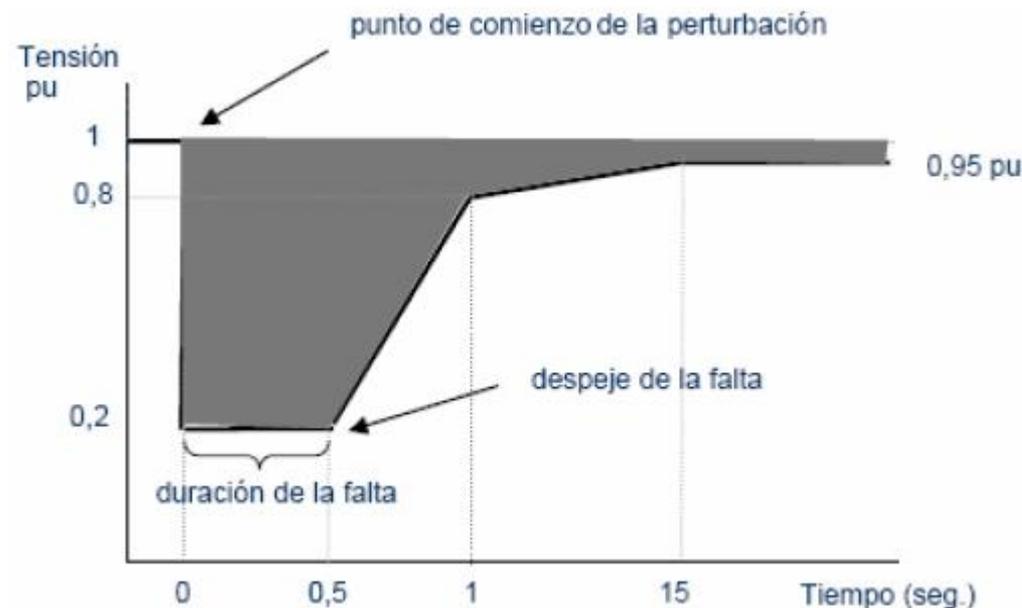


- Amplitud
 - Huecos de tensión e interrupciones breves:
 - Bajadas bruscas (entre el 10% y el 100%) del valor eficaz de la tensión
 - Seguidas de un restablecimiento después de un lapso de tiempo comprendido entre 10 milisegundos y algunos segundos.
 - Impulsos de tensión:
 - Variaciones bruscas del valor instantáneo de la tensión.
 - Magnitudes que pueden llegar a ser varias veces la de la tensión nominal
 - Duración comprendida entre algunos microsegundos y pocos milisegundos.

Impacto de la GD en la calidad de energía



- Un impacto de la GD importante se produce debido a los huecos de tensión que puede haber en la red.

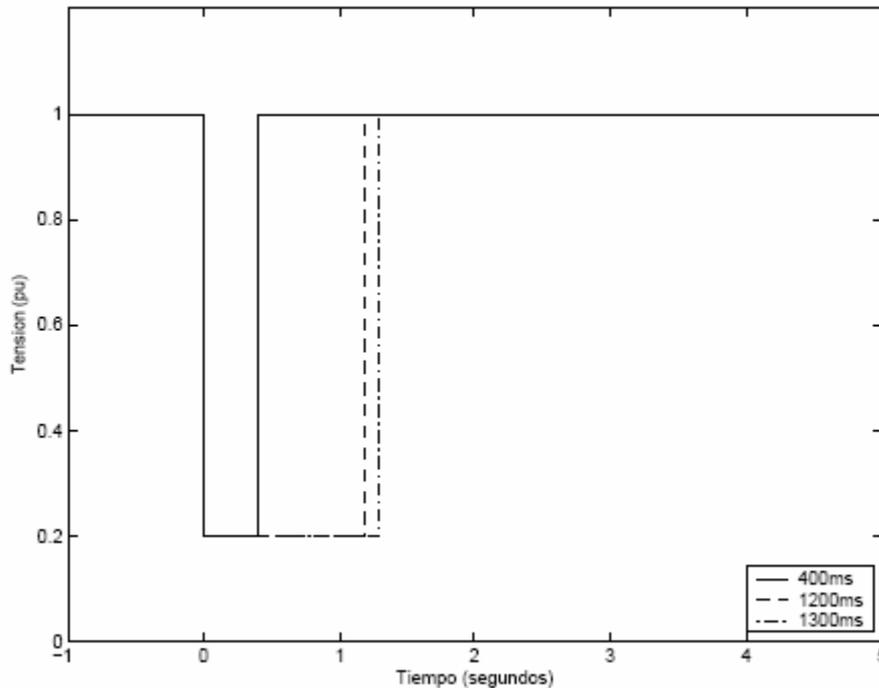


Hueco de tensión exigido en instalaciones eólicas (España)

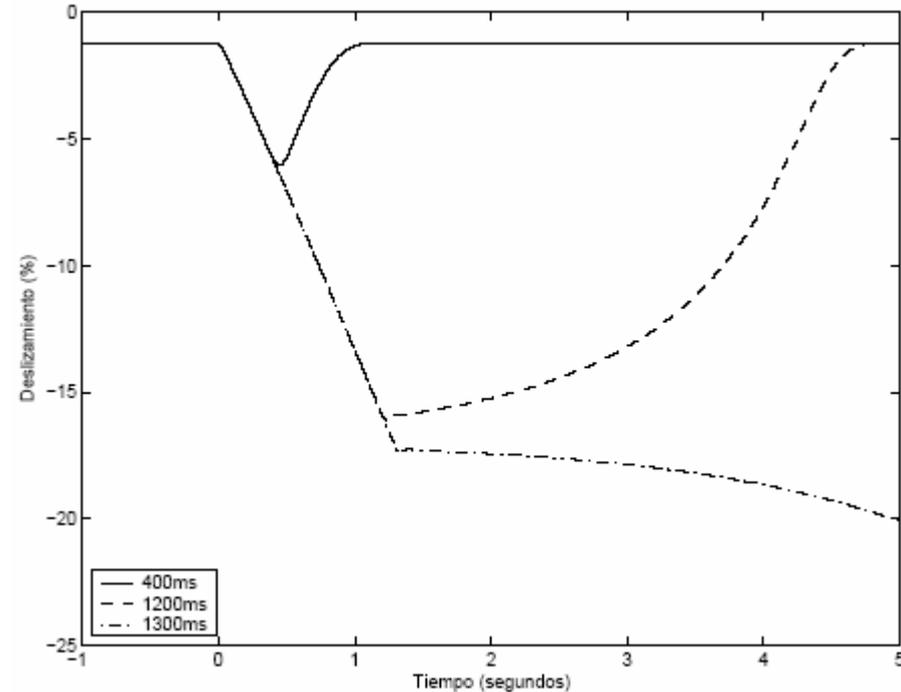
Impacto de la GD en la calidad de energía



- Efectos que tiene sobre la generación eólica un hueco de tensión



Huecos de tensión del 80% de duración 400, 1200 y 1300 ms

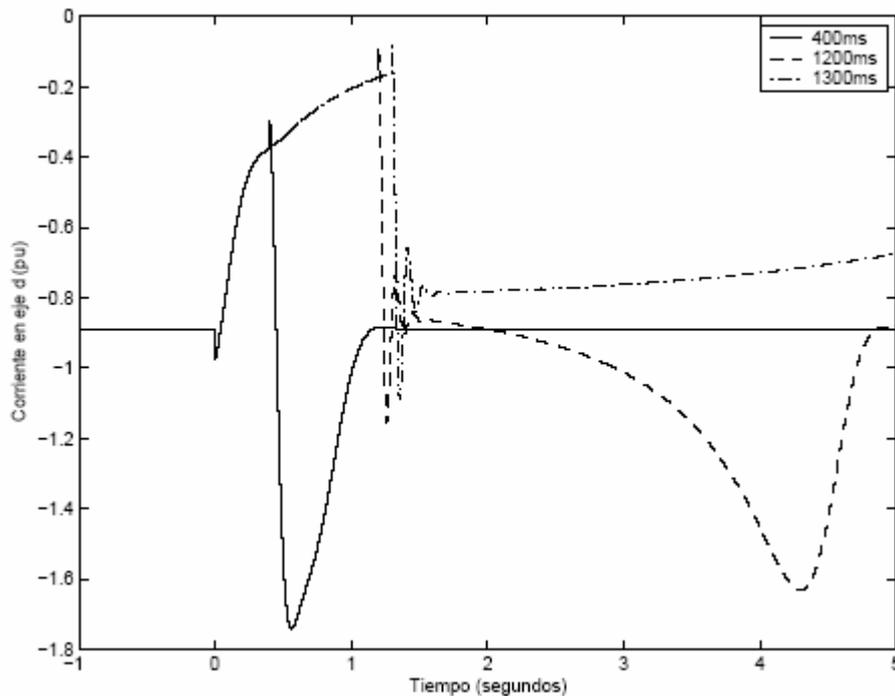


Deslizamiento del generador eólico ante huecos de 400, 1200 y 1300 ms

Impacto de la GD en la calidad de energía

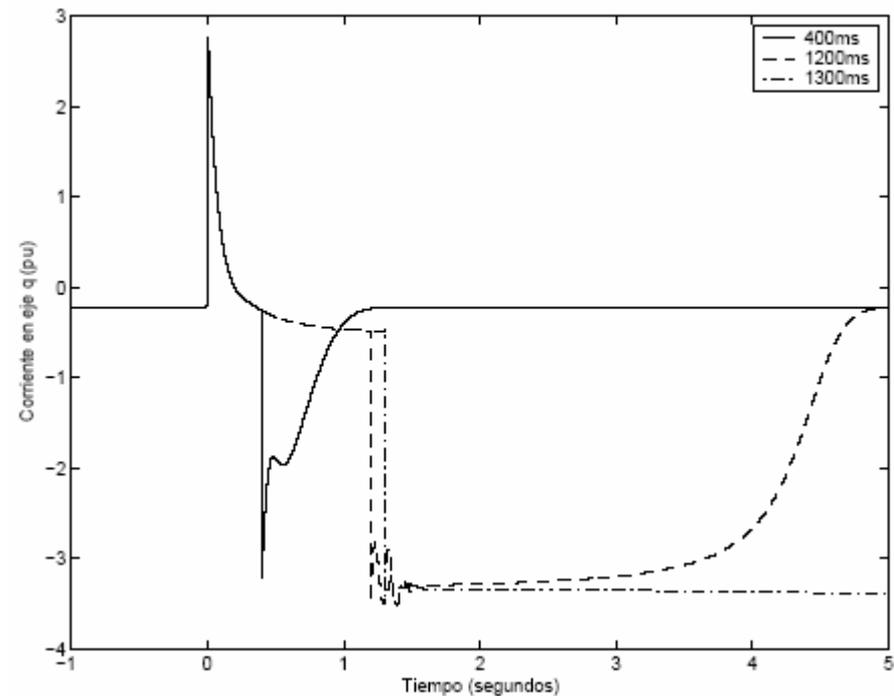


- Efectos que tiene sobre la generación eólica un hueco de tensión



Intensidades en eje directo del generador eólico ante huecos de

400, 1200 y 1300 ms

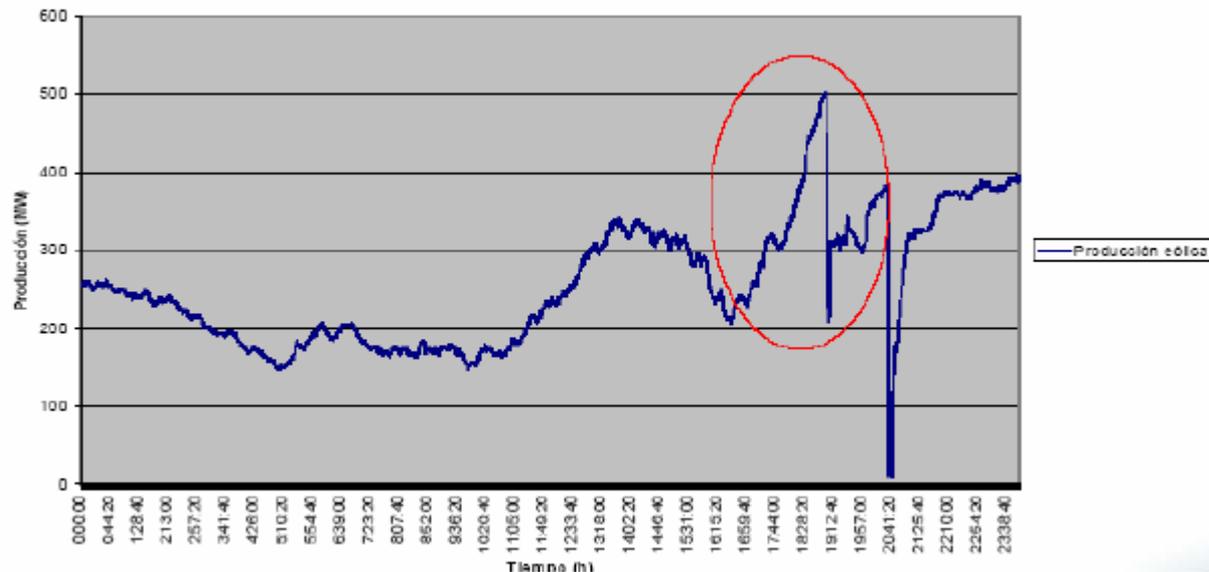


Intensidades en eje transversal del generador eólico ante huecos de

400, 1200 y 1300 ms

Efectos que tiene sobre la generación eólica un hueco de tensión

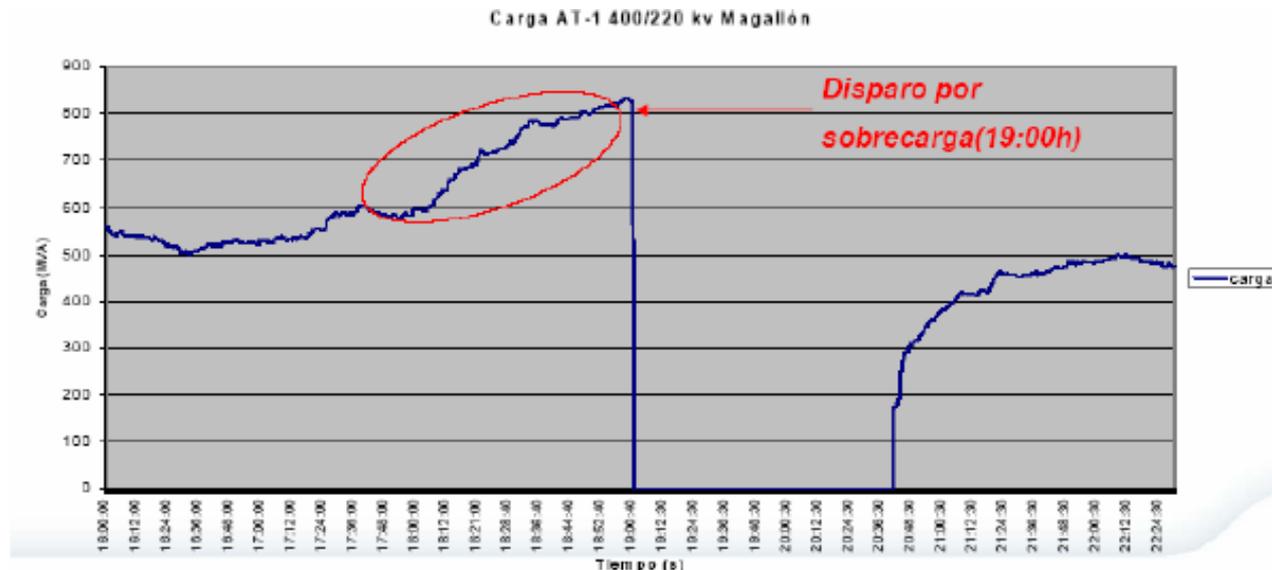
- Caso estudio: Incidente de Magallón 1-Agosto-2005, Red eléctrica Española
- 16:30 horas se produce un aumento de generación que produce disparo del transformador de evacuación 220/440kv de Magallón



Evolución de la producción eólica, Magallón-220kV

Efectos que tiene sobre la generación eólica un hueco de tensión

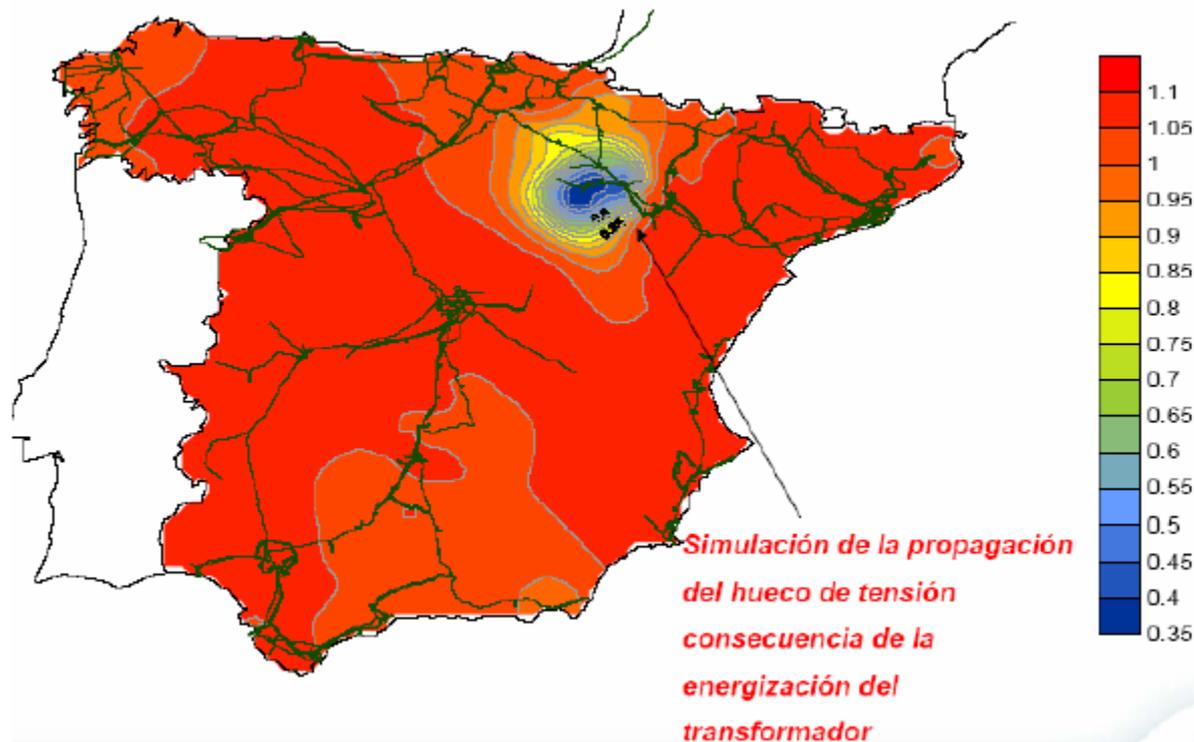
- Caso estudio: Incidente de Magallón 1-Agosto-2005, Red eléctrica Española



Evolución de la carga del trafo 400/220kV, Magallón

Efectos que tiene sobre la generación eólica un hueco de tensión

- Caso estudio: Incidente de Magallón 1-Agosto-2005, Red eléctrica Española



Hueco de tensión, incidente Magallón

Efectos que tiene sobre la generación eólica un hueco de tensión

- Caso estudio: Incidente de Magallón 1-Agosto-2005, Red eléctrica Española



Pérdida de producción eólica debido al incidente Magallón

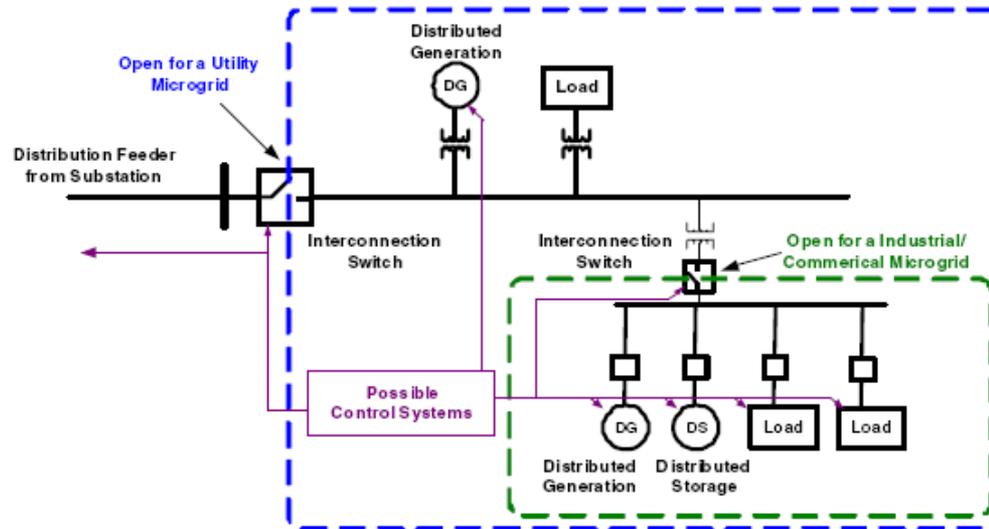
Otros estudios

- Estabilidad
 - Su propósito es verificar que el sistema pueda soportar las perturbaciones
- Transitorios
- Operación en isla

Esquemas de seguridad y operación en isla



- Operación en Isla: Es una condición en la cual una porción del sistema, que contiene tanto carga como fuentes distribuidas, permanece energizada mientras está aislada del resto del sistema de potencia*.



Tomado de **

* IEEE Standard dictionary of electrical and electronic terms, IEEE Standard.100-2000, 2000.

** B. Kroposki, "An integration facility to accelerate deployment of distributed energy resources in microgrids," *Power & Energy Society General Meeting, PES '09. IEEE*, pp.1-4, 26-30 July 2009

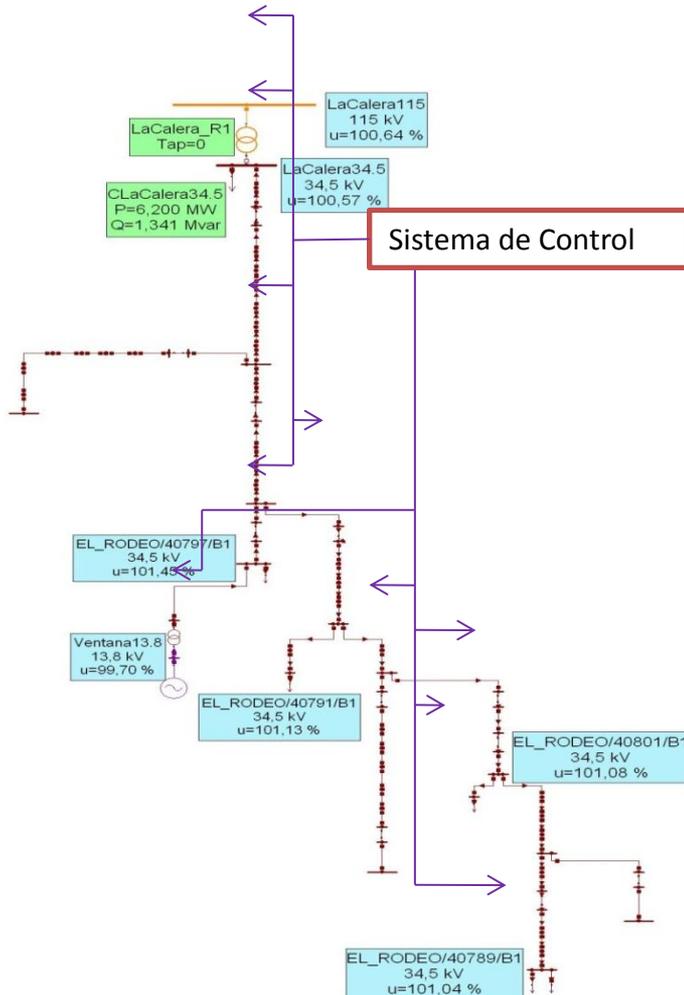
Esquemas de seguridad y operación en isla



- **Problemas operación en Isla:**
 - Alto-bajo voltaje/frecuencia.
 - Balance entre la carga y generación.
 - Aporte del generador a posibles fallas dentro de la isla.
 - Contar con dispositivos de sincronización.
 - Manejar los cambios de carga durante la operación en isla.
- **Condiciones para la operación en isla:**
 - Carga total \leq generación total (tanto potencia activa como reactiva).
 - Control de frecuencia para controlar cargas que cambian velozmente.
 - El regulador de voltaje del generador (AVR) debe suministrar voltaje adecuado.
 - Sistema de deslastre de cargas por baja frecuencia.
 - Limitar el tamaño máximo de las cargas individuales.

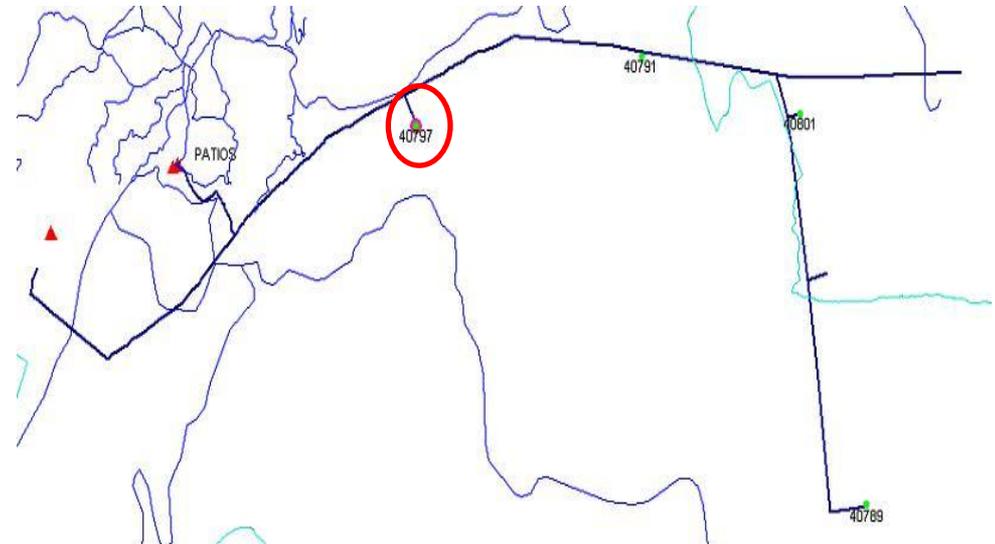
D. Tourn J. Gomez and G. Campetelli. Generación distribuida: Operación en isla intencional. Technical report, Universidad Nacional de Río Cuarto, 2010.

Caso de estudio y posibles esquemas de control

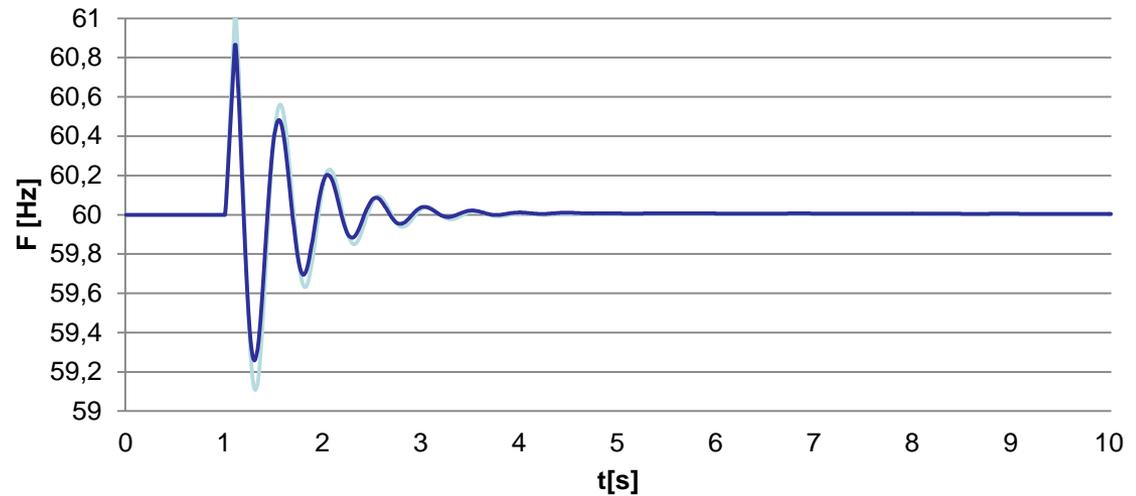
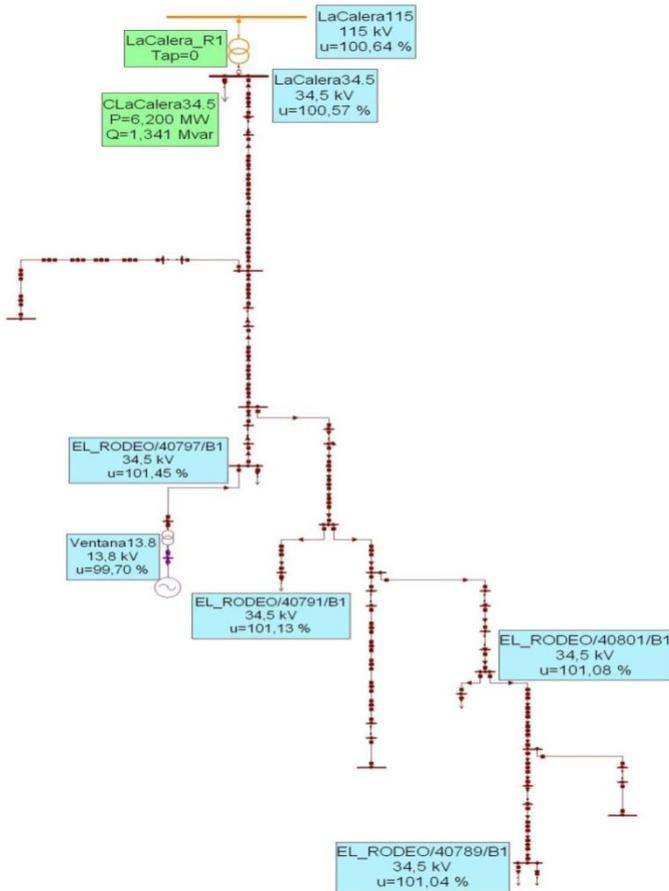


Datos generales del sistema

- Nombre del circuito: El Rodeo 34,5kV
- Carga el Rodeo: 1,2MW
- S/E alimentadora: La Calera 115kV
- Carga la Calera: 6,2MW
- Nombre del generador: Ventana
- Generador: Pequeña Central Hidroeléctrica (Sincrónico)
- Generación PCH: 6,84MW
- Nivel de tensión PCH: 13,8kV
- Nodos de usuarios: 40797 40791 40801 40789



Operación interconectada



Resultados de la operación en isla en el Rodeo



Simulaciones

Caso	Relación Carga/Generación	Esquema de control*
1	1,08	No
2	1,08	Deslastre de Carga
3	0,18	No
4	0,93	No

Resultados

Caso	Resultado
1	Bajo Voltaje/Frecuencia (dentro de los limites)
2	Voltaje/Frecuencia adecuados
3	Alto Voltaje/Frecuencia (fuera de los limites)
4	Voltaje/Frecuencia adecuados

La generación de la isla debe ser mayor o igual al valor de la carga, más las pérdidas en la misma.

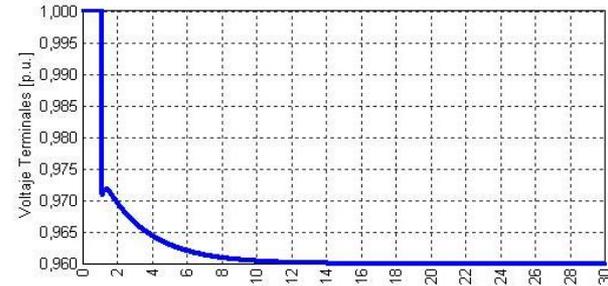
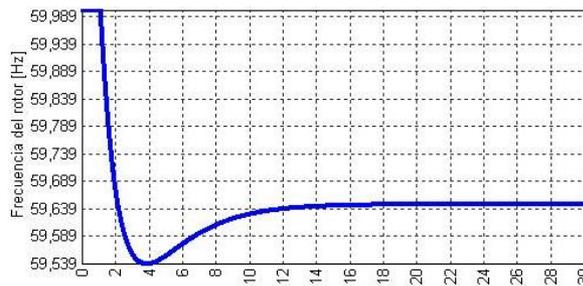
Para la operación en isla intencional se debe preparar y conocer muy bien el sistema de distribución en donde se va realizar esta condición de operación.

* En todos los casos el generador contaba con reguladores.

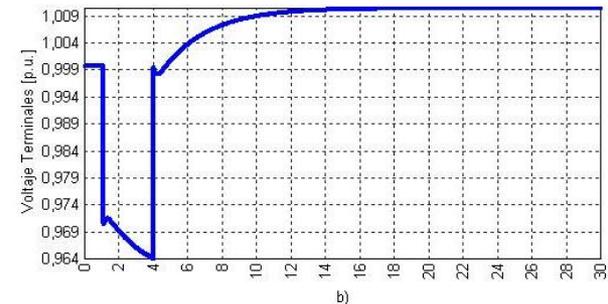
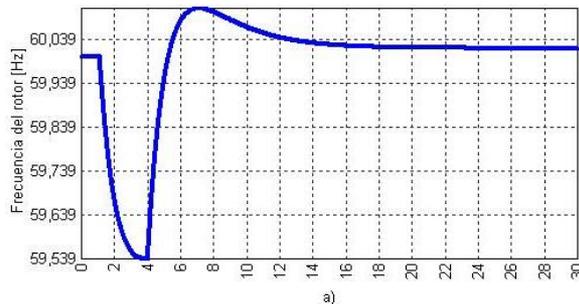
Simulaciones casos de estudio operación en isla



Caso 1 – Frecuencia y Voltaje



Caso 2 – Frecuencia y Voltaje

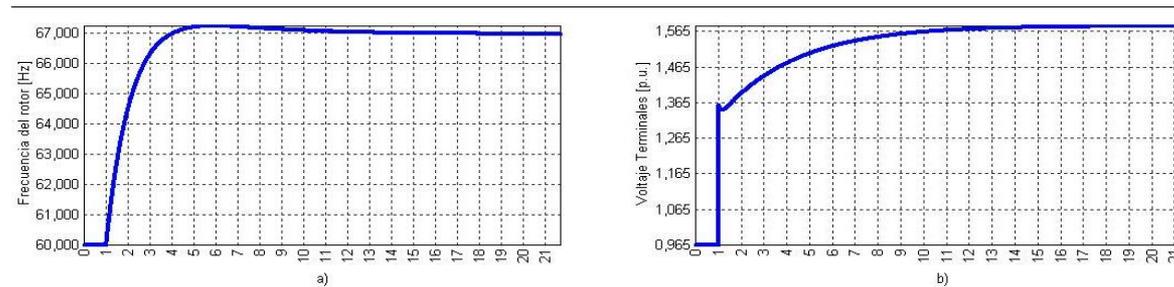


Disponer de un sistema de deslastre de cargas por baja frecuencia. Con el fin de mantener el balance entre carga y generación.

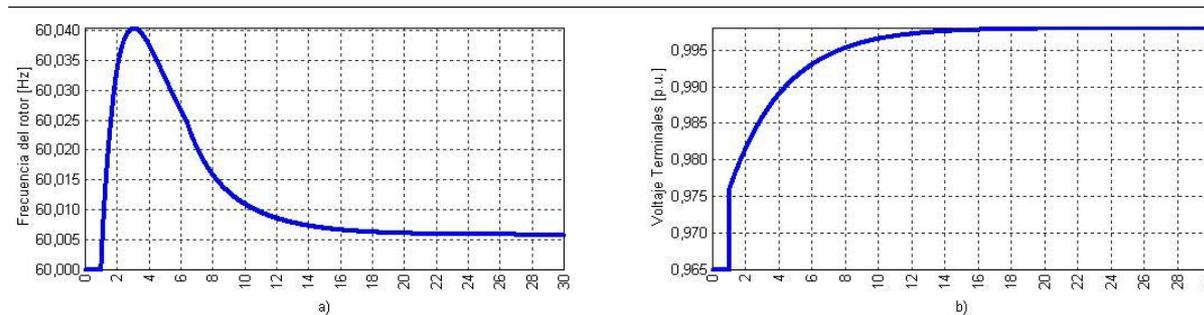
La carga deslastrada durante la operación en isla deben ser moderada para no causar grandes variaciones de frecuencia y voltaje.

Simulaciones casos de estudio operación en isla

Caso 3- Frecuencia y Voltaje



Caso 4 - Frecuencia y Voltaje



El voltaje dado por el generador es importante ya que las barras de los usuarios siguen el mismo comportamiento, si este es la única fuente de potencia reactiva de la isla.

Impacto de GD a nivel de transmisión



- Se presenta la evaluación realizada en el sistema de transmisión colombiano para diferentes opciones de GD
- A nivel de las redes de transmisión y sub-transmisión:
 - Se modeló el sistema colombiano tomando las redes de 500, 230, 115, 110, 66 y 57.5kV de todo el sistema (año 2007) que corresponden a lo que en Colombia se define como Sistema de Transmisión Nacional (STN) y Sistemas de Transmisión Regional (STR's), con base en datos suministrados por la UPME
 - El sistema fue clasificado en 8 regiones o zonas que obedecen a una organización geográfica de las redes: Bogotá, Nordeste, Cauca – Nariño, CHEC, Costa, EPM, EPSA, THB

Impacto de GD a nivel de transmisión

- Criterios para el modelamiento de la instalación y ubicación de GD:
 - Según los factores nodales, en las zonas que presenten los mayores factores y que sean más sensibles a los cambios de potencia activa.
 - Según sugerencia de la UPME, de acuerdo a los análisis de planeamiento, en las zonas que tienen potencial para instalación de este tipo de generación:
 - Bogotá 20 MW
 - Valle 82 MW
 - Cerromatoso 19 MW
 - Costa 100 MW

$$FN = 1 - \frac{\Delta P_{Sistema}}{\Delta P_{Nodo}}$$

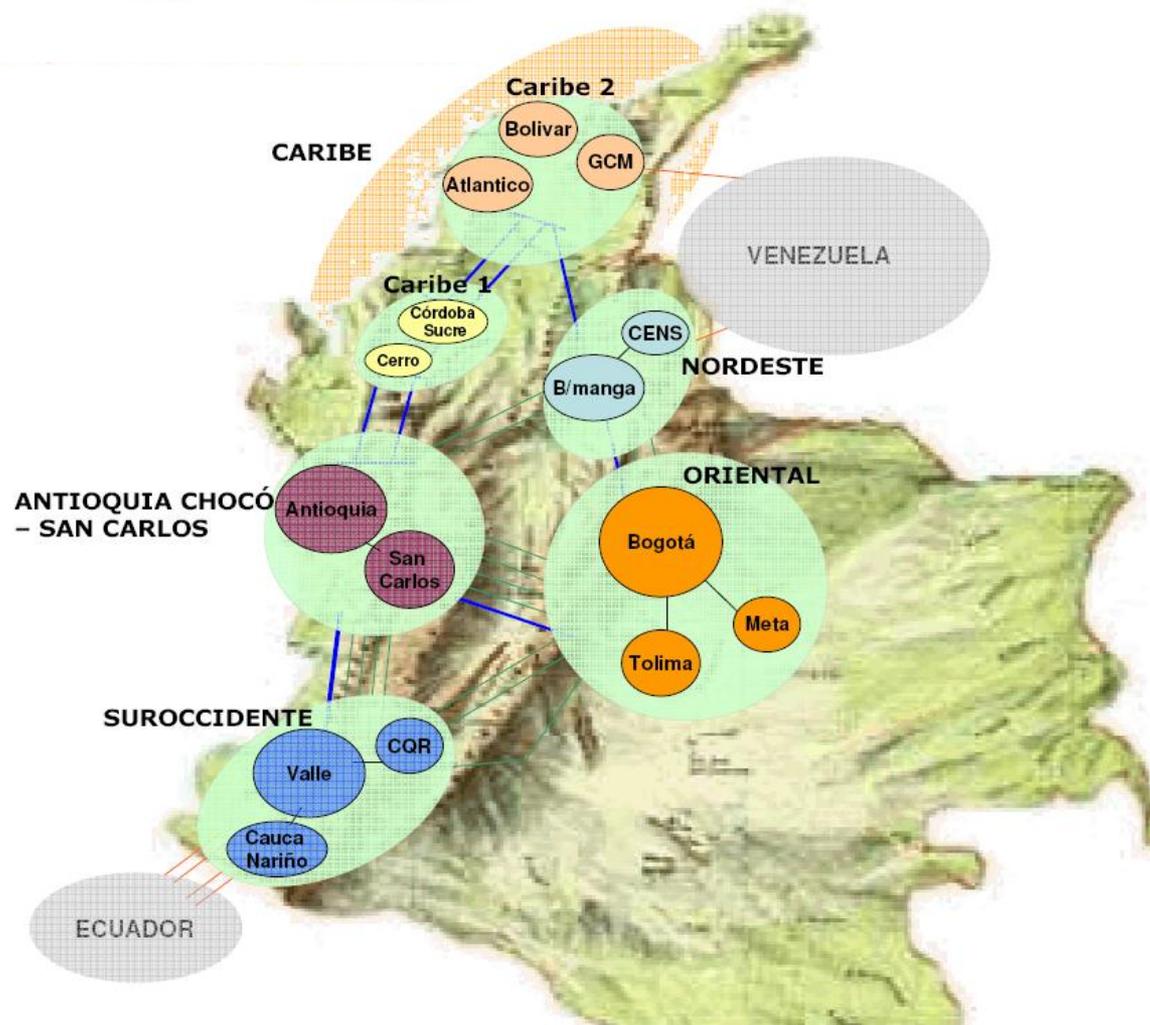
Impacto de GD a nivel de transmisión

- Aunque por sus características técnicas, la GD se instala en alimentadores de media tensión (en Colombia tensiones de 11.4, 13.2 y 34.5kV normalmente), no se contaba con la información para modelar dichos alimentadores
- La instalación de GD se modeló como una reducción de potencia activa en los nodos (zonas) en los cuales se instaló (entre el 5 y 10% de la demanda total atendida por el sistema centralizado en el nodo)
- Asignación Generación – Carga (“Redespacho”)
 - A prorrata de la generación despachada en cada unidad generadora
 - Con prioridad a las unidades generadoras de la misma zona geográfica

Áreas y subáreas del SIN

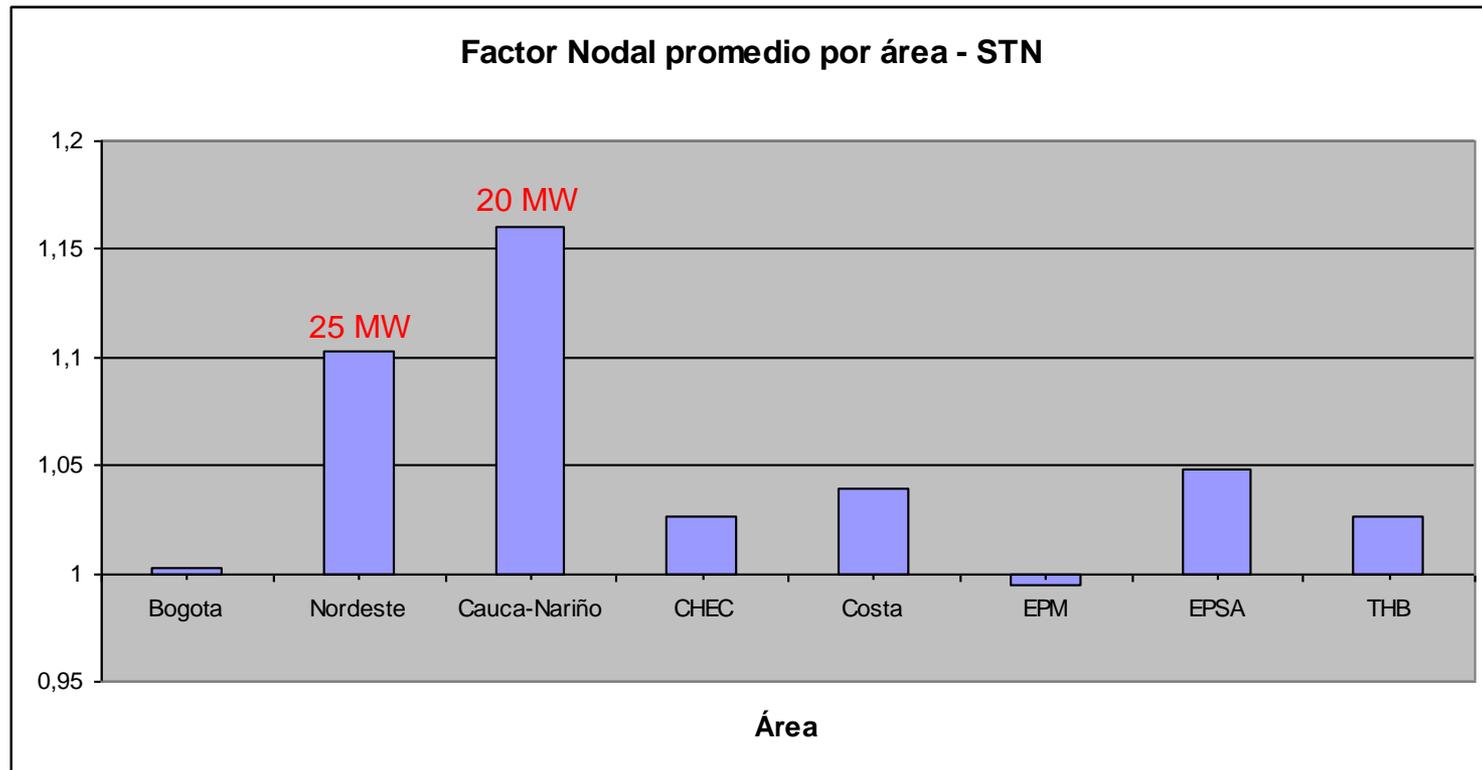


CONSTRUIAMOS FUTURO

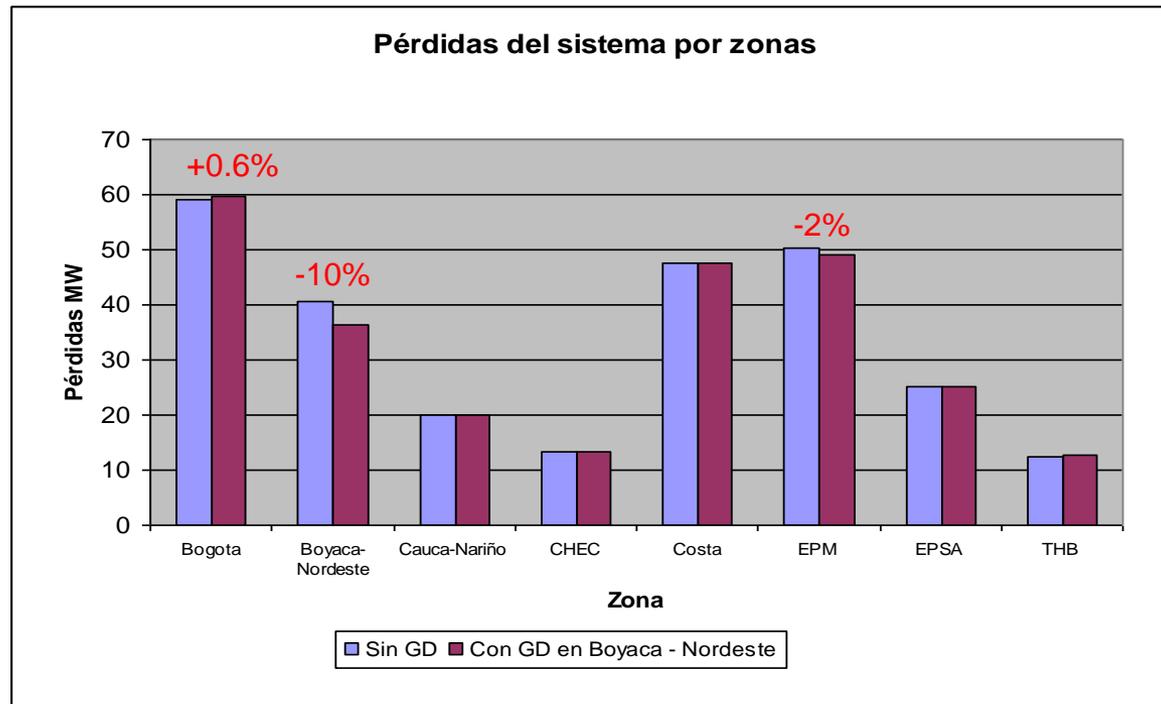


Fuente: XM

Primer criterio: Factores nodales



Caso 1: Instalación de 25 MW de GD en Nordeste

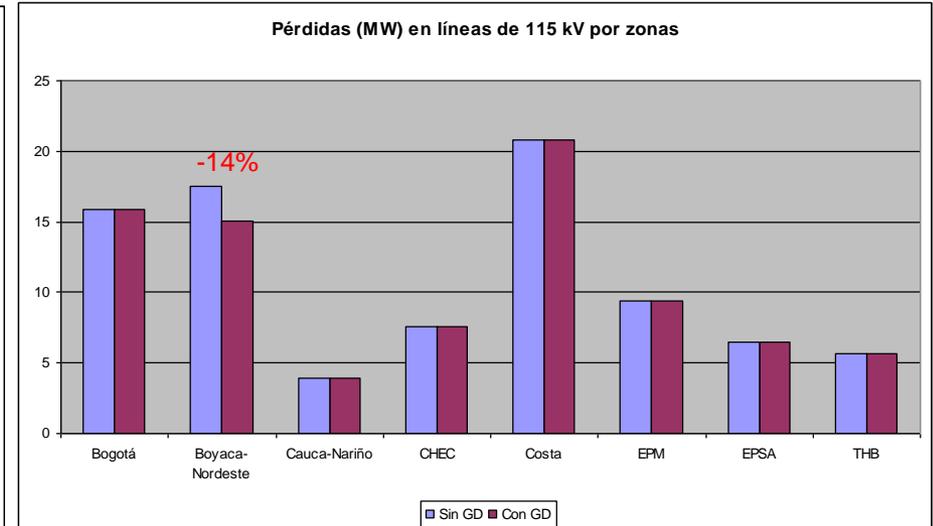
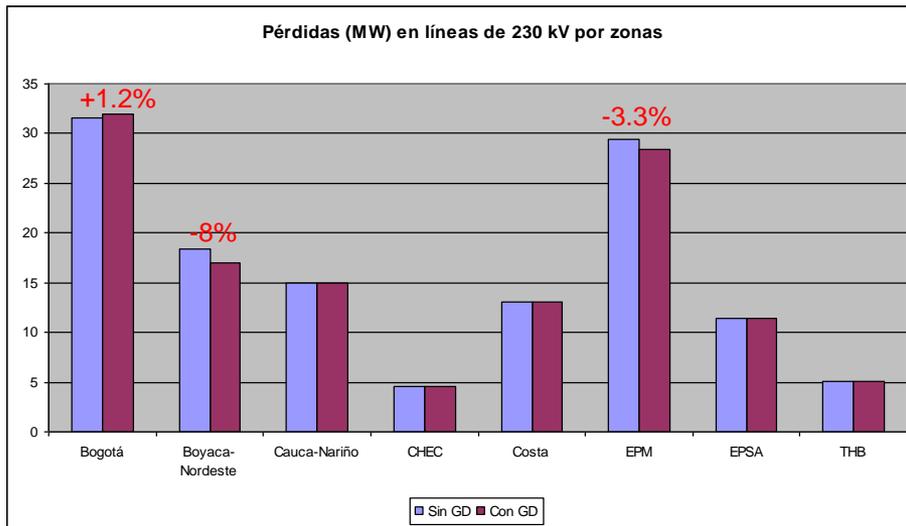


Cambio en pérdidas agregadas de toda la red: -1.86%

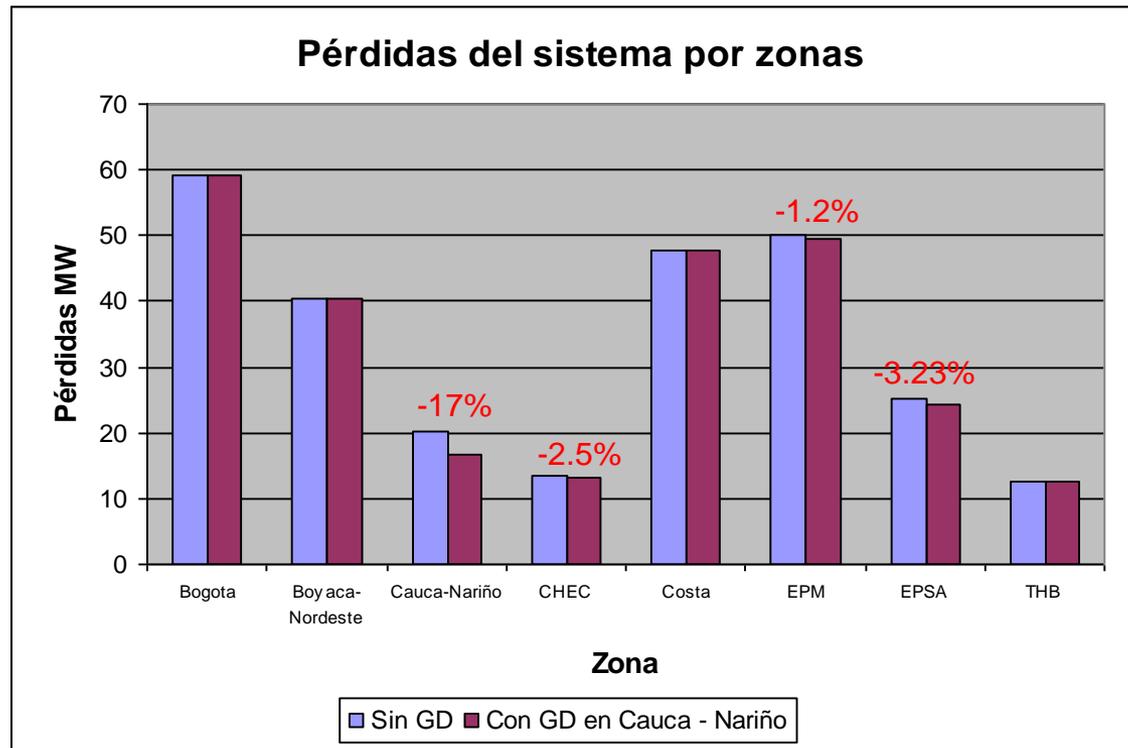
Perfil de voltajes

- 230 kV: se encontró un aumento cercano al **2%** en promedio en los voltajes de nodo. Adicionalmente uno de los voltajes de los cuatro nodos que sin GD se encontraban fuera de rango (entre 90 y 110%), mejoró y se situó dentro de los límites (Toledo230)
- 115 kV: el efecto fue similar al de los nodos de 230 kV, aunque el aumento en los voltajes estuvo alrededor del **3%**. En 4 de los 7 nodos más críticos se instaló GD (Lizama115, SanGil115, Sesquile115 y Banadia115) y el nodo Banadia115 mejoró su voltaje para situarse dentro de los límites.

Pérdidas en líneas por nivel de tensión



Caso 2: Instalación de 20 MW de GD en Cauca – Nariño

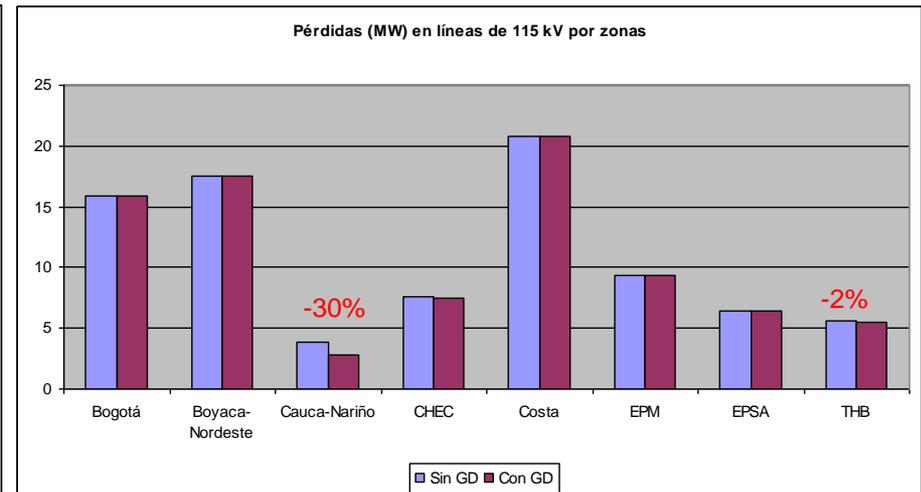
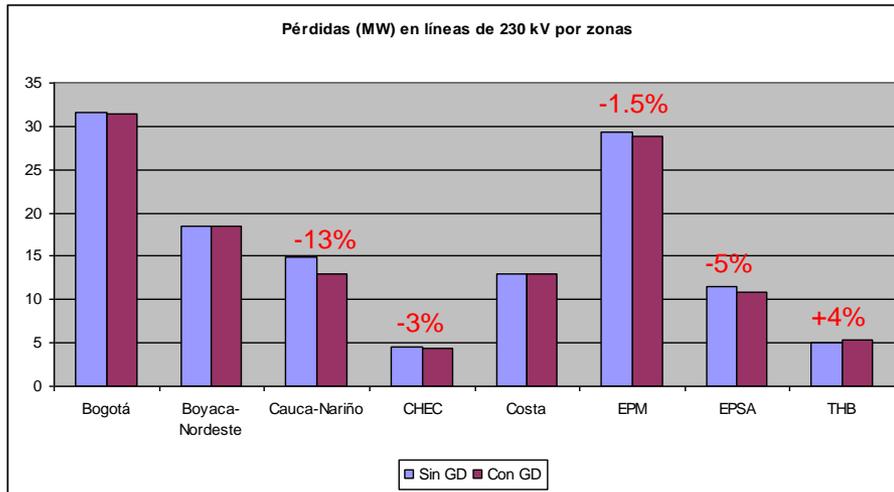


Cambio en pérdidas agregadas de toda la red: -2%

Perfil de voltaje

- 230 kV: se encontró un aumento cercano al **12%** en promedio en los voltajes de nodo. Pero en algunos nodos los voltajes suben mucho y salen de rango. Esto se debe principalmente a que esta es una zona con alta componente de compensación capacitiva debido a los problemas de bajos voltajes que se presenta por la poca componente de generación
- 115 kV: el efecto es más fuerte y se ven aumentos de voltaje alrededor de **20%**, además solo 4 de los 15 nodos se mantienen en niveles aceptables, todos los demás sobrepasan el límite.

Pérdidas en líneas por nivel de tensión

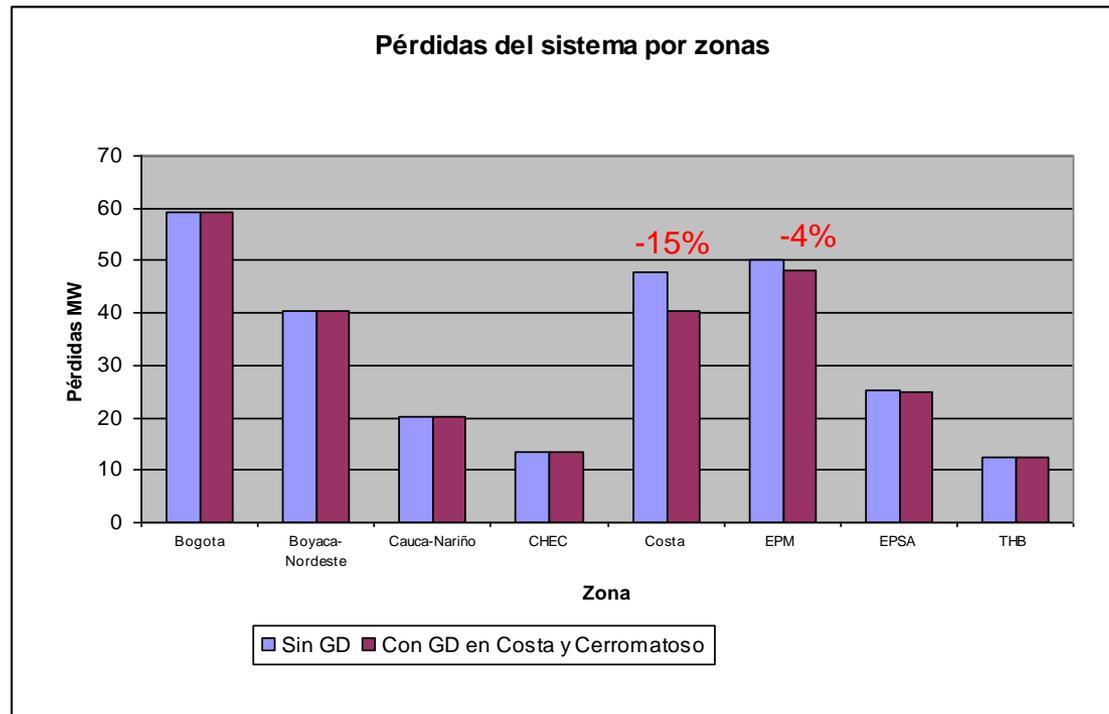


Segundo criterio: Sugerencia de la UPME



- Instalación de GD de acuerdo a los análisis de planeamiento, en las zonas que tienen potencial:
 - Bogotá 20 MW
 - Valle 82 MW
 - Costa y Cerromatoso 119 MW
- En este caso se conoce la capacidad a instalar en la zona, y para determinar en qué nodos se instala la GD, se determinan los nodos que tienen mayores factores nodales
- La capacidad instalada en cada nodo corresponde a un porcentaje entre 5 – 10 % de la demanda de ese nodo, hasta completar la capacidad instalada total

Caso 5: 119 MW en Costa y Cerromatoso

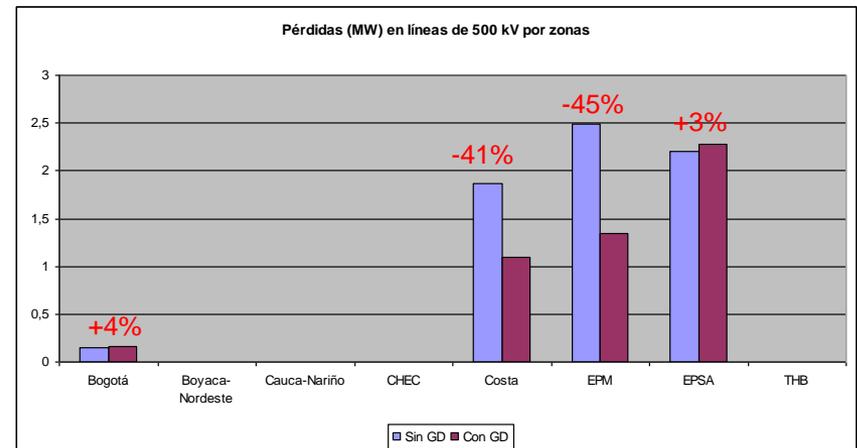
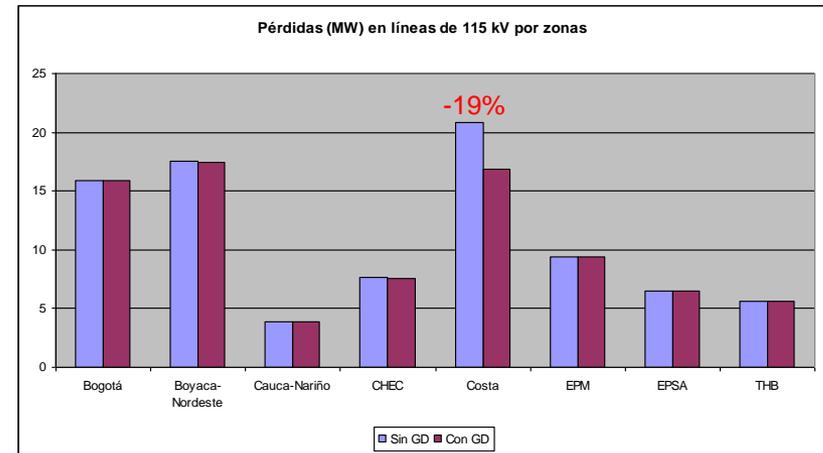
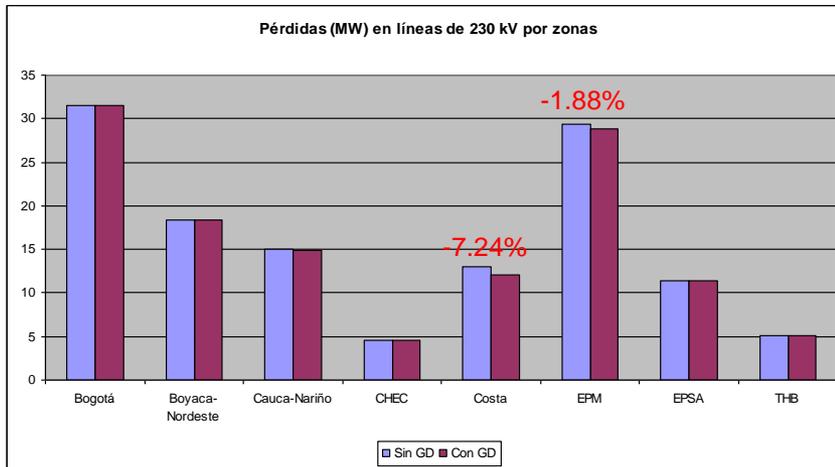


Cambio en pérdidas agregadas de toda la red: -3.5%

Perfil de voltaje

- 500 Kv: se encontró un aumento cercano al **0,15%** en promedio en los voltajes de nodo.
- 230 kV: se encontró un aumento cercano al **0,32%** en promedio en los voltajes de nodo.
- 115 kV: se ven aumentos de voltaje alrededor de **0,6%**, uno de los nodos que se encontraba fuera del rango de voltaje mejora.
- 66 kV: se ven aumentos de voltaje alrededor de **1,14%**.

Pérdidas en líneas por nivel de tensión



Problema de planeamiento (convencional)



Ubicar recursos de manera eficiente: capacidad adecuada de subestaciones y alimentadores para cubrir la demanda(*)

- Bajo condiciones normales
- Para emergencias

$$\min \mathbf{F}(\mathbf{x}) = \min ([f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})])$$

$$\mathbf{x} \in \Omega$$

$$\mathbf{g}_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j = 1, 2..p$$

$$\mathbf{h}_k(\mathbf{x}) \leq 0 \quad k = 1, 2..q$$

- Variables: discretas y enteras

- Problema combinatorio, no lineal y no convexo
- Restricciones
 - Demanda
 - Ecuaciones de flujo de carga
 - Perfiles de voltaje
 - Límite térmico de los equipos
 - Índices de confiabilidad
- Funciones objetivo
 - Minimización de costos (inversión y operación)
 - Minimización de pérdidas

Problema de planeamiento (convencional)



Ubicar recursos de manera eficiente(*)

- Programación matemática clásica
 - Optimización (Lineal)
 - Programación entera (Mixta)
 - Branch & bound
 - Optimización multi-objetivo
- Meta-heurísticas
 - Algoritmos genéticos
 - Búsqueda tabú
 - ...
- Inteligencia artificial y sistemas expertos
- Muchos objetivos (no siempre conflictivos)
- Incertidumbres (crecimiento y ubicación de la demanda; fallas u ocurrencia de daños)
- Reglas de planeamiento urbano

(*) See S. Kathor, L. Leung. 1997. Power Distribution Planning: A Review of Models and Issues. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 12, No. 3.

Problema de planeamiento de redes inteligentes



- Diferentes perspectivas (Desarrolladores de proyectos, empresa eléctrica, operador de red, consumidor, regulador, etc.)
- Diferentes objetivos, algunos conflictivos
- Nuevas restricciones (ambientales, uso de la tierra)



- Formulación del problema 'completo'
- Mejorar los métodos tradicionales (incertidumbres, análisis de escenarios, fronteras de Pareto)
- Utilizar nuevas metodologías (diferentes agentes, respuesta dinámica, ...)
- Internalización de externalidades
- Consideración de manejo del riesgo

Ubicación óptima de GD – operador de red



- Problema combinatorio, no lineal, y no convexo
- Objetivos (lineales y no lineales)
 - **Min (costo total) Min (pérdidas) Max (BC) Max (P_{GD})**
- Restricciones Constraints (lineales y no lineales)
 - Ecuaciones de flujo de carga
 - Perfiles de voltaje
 - Límites térmicos
 - Índices de confiabilidad
 - Cantidad y tamaño de la GD
 - Presupuesto
- Variables de decisión (discretas y enteras)
 - **P_{GD} instalada Ubicación # de unidades de GD**

Dilema optimización / modelamiento

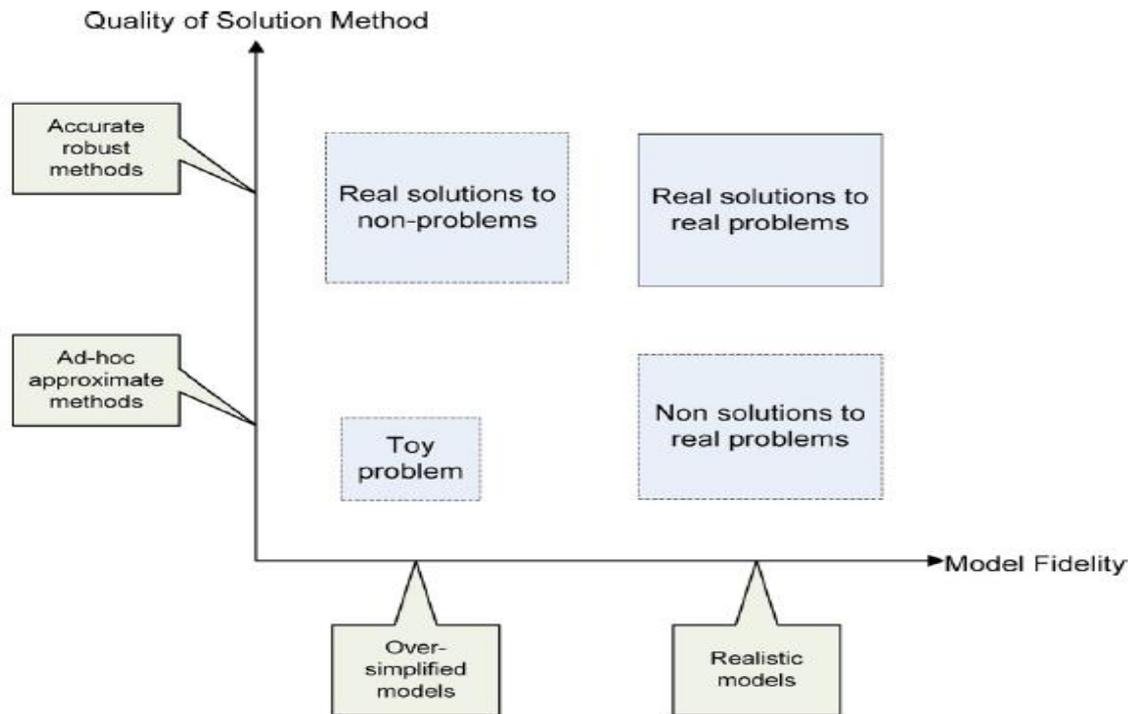


Fig. 1. Optimization/modeling dilemma. Adapted from [16].

Tomado de: Alarcon, et al., Multi-objective planning of DER, renewable and sustainable energy reviews, 14, 2010

Instalación de GD

- La GD podría ser instalada por usuarios finales, desarrolladores de proyectos o por el operador de red.
- El operador de red la podría utilizar para mejorar la operación del sistema, y puede dar señales para que los demás agentes se instalen en localizaciones que le permitan alcanzar objetivos estratégicos.



La instalación de GD en ubicaciones no óptimas puede resultar en aumentos de las pérdidas, reconfiguración de los esquemas de protección, problemas de voltaje, etc., lo que implicaría un aumento en los costos, y por lo tanto, un efecto contrario al deseado



Definición del problema de ubicación de GD



$$\min \mathbf{F}(\mathbf{x}) = \min ([f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})])$$

$$\mathbf{x} \in \Omega$$

$$\mathbf{g}_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j = 1, 2..p$$

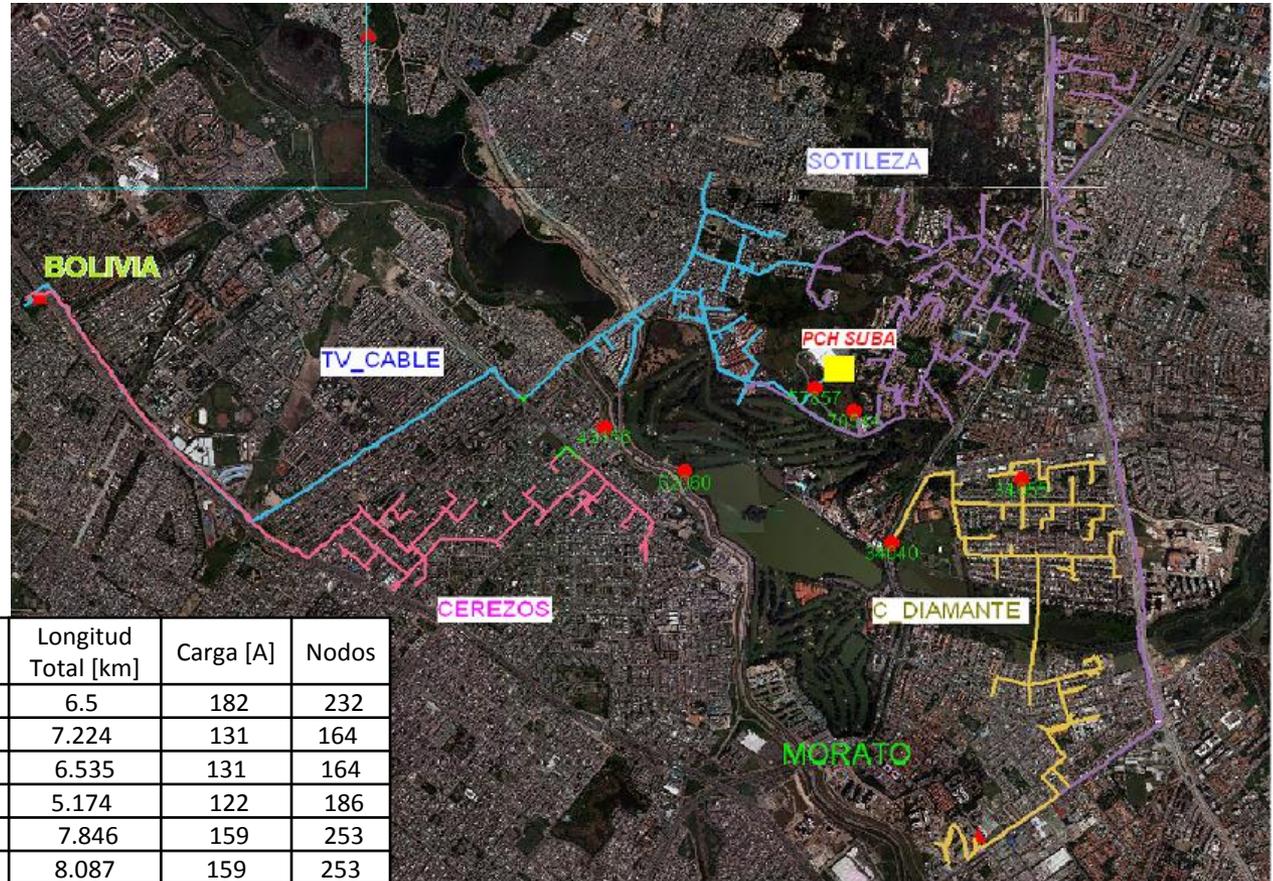
$$\mathbf{h}_k(\mathbf{x}) \leq 0 \quad k = 1, 2..q$$

- Problema combinatorio no convexo
- Objetivos (algunos no lineales)
 - **Min (Costos)** **Min (Pérdidas)** **Max (RBC)** **Max (P_{GD})**
- Restricciones (algunas no lineales)
 - Ecuaciones de flujo de carga
 - Perfil de voltaje
 - Límites térmicos de los elementos (sobrecargas)
 - Nivel de confiabilidad
 - Cantidad y/o tamaño de las unidades de GD
 - Presupuesto
- Variables de decisión (discretas y enteras)
 - **P_{GD} instalada** **Ubicación** **# de unidades de GD**

Ejemplo: PCH Suba EAAB Sistema Codensa



PCH Suba:
2.5MW
11.4kV



Circuito	Longitud [km]	Longitud Adicional [km]	Longitud Total [km]	Carga [A]	Nodos
Sotileza	6.5	0.098	6.5	182	232
Diamante1	3.434	3.79	7.224	131	164
Diamante2	3.375	3.16	6.535	131	164
TVCable	5.174	0.171	5.174	122	186
Cerezos1	5.516	2.33	7.846	159	253
Cerezos2	5.187	2.90	8.087	159	253

Ejemplo: PCH Suba EAAB Sistema Codensa



- Formulación del problema:

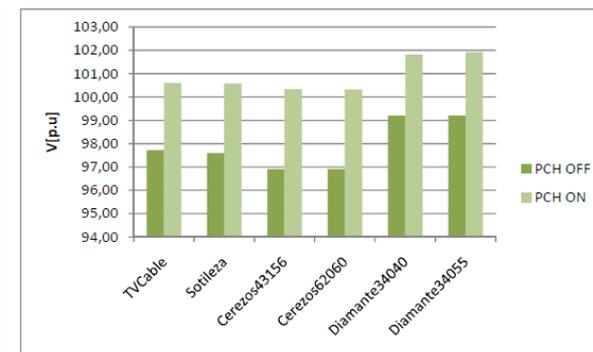
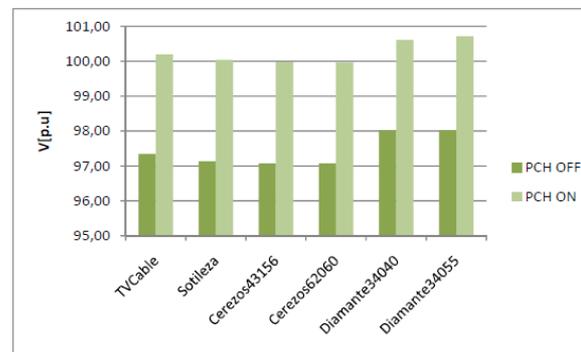
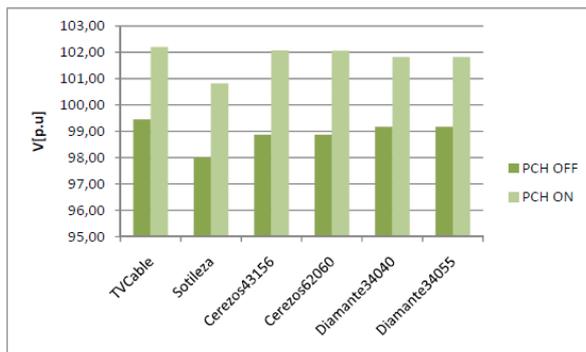
$$Max BN = A_{Pérdidas} - C_{Inv} = (p_{Per}^0 - p_{Per}^{GD}) \times 8760 \times fp \times p - CU_{UC} \times longitud$$

s. a.

$$f_j \leq f_j^{max} \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$v_{min} \leq V_i \leq v_{max} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

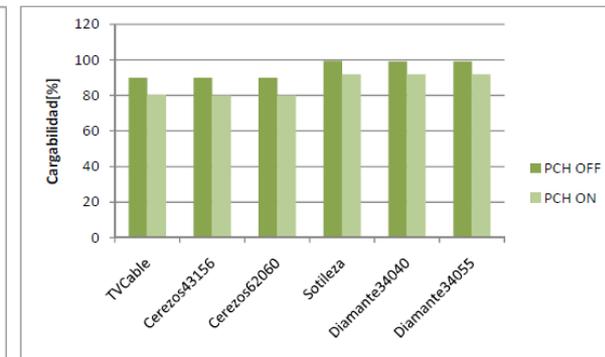
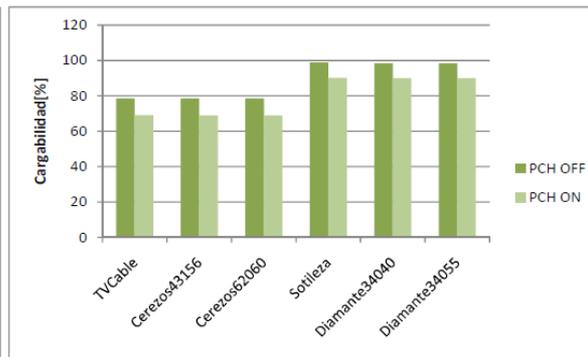
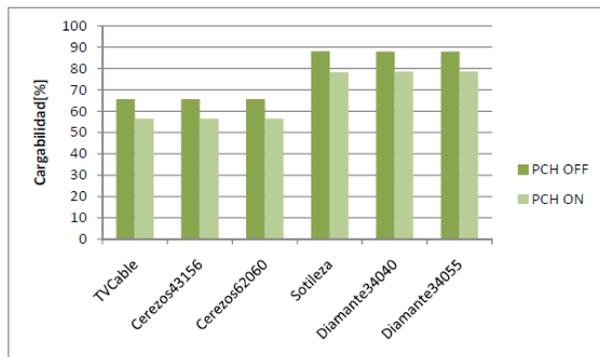
- Factibilidad de las soluciones:
 - Perfil de voltaje promedio (2011, 2015 y 2019)



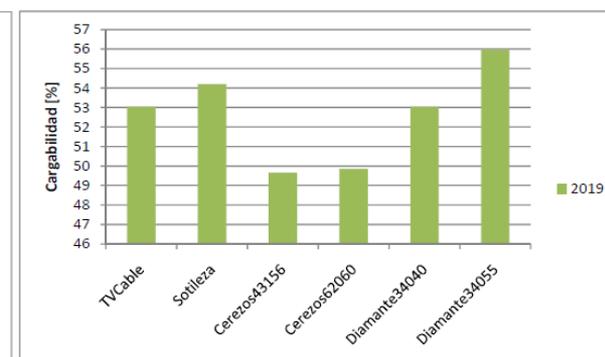
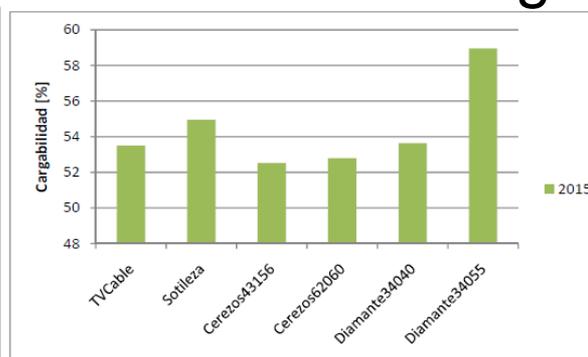
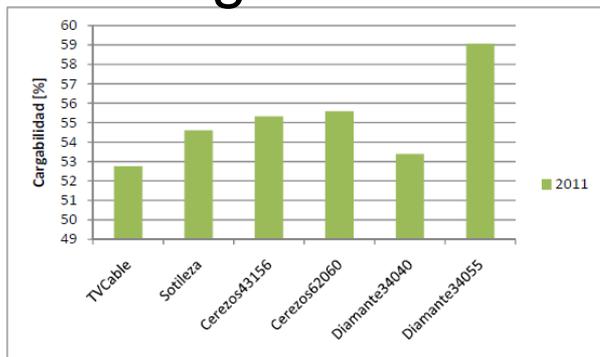
Ejemplo: PCH Suba EAAB Sistema Codensa



- Cargabilidad en los transformadores (2011, 2015 y 2019)



- Cargabilidad en los tramos más cargados



Ejemplo: PCH Suba EAAB Sistema Codensa



- Reducción en pérdidas

	Reducción de pérdidas (kW)								
	2011			2015			2019		
	Bogotá	11.4kV	Totales	Bogotá	11.4kV	Totales	Bogotá	11.4kV	Totales
TVCable	86,05	17,573	103,623	99,01	29,387	128,397	139,74	39,577	179,317
Cerezos43156	85,94	-0,794	85,146	99,22	14,89	114,11	142,27	57,724	199,994
Cerezos62060	86,21	8,26	94,47	99,54	24,253	123,793	142,59	62,585	205,175
Sotileza	95,82	48,509	144,329	114,57	72,332	186,902	159,68	118,659	278,339
Diamante34040	91,84	-34,4	57,44	109,12	-26,2	82,92	149,56	-13	136,56
Diamante34055	92,2	-29	63,2	109,56	-17,6	91,96	150,21	-3,5	146,71

- Alternativas seleccionadas

	Long. adic.(km)	C _{Inv} (\$ Dic. 2010)	B _{Pérdidas} (\$ Dic. 2010)	Beneficio Neto (\$ Dic. 2010)
TVCable	0,098	9.992.363	512.080.099	502.087.736
Cerezos43156	2,33	107.061.559	453.173.616	346.112.056
Cerezos62060	2,9	133.252.585	497.924.910	364.672.326
Sotileza	0,171	17.435.654	780.490.556	763.054.902
Diamante34040	3,79	174.147.343	276.184.135	102.036.792
Diamante34055	3,16	145.199.368	315.989.572	170.790.205

GD Rural

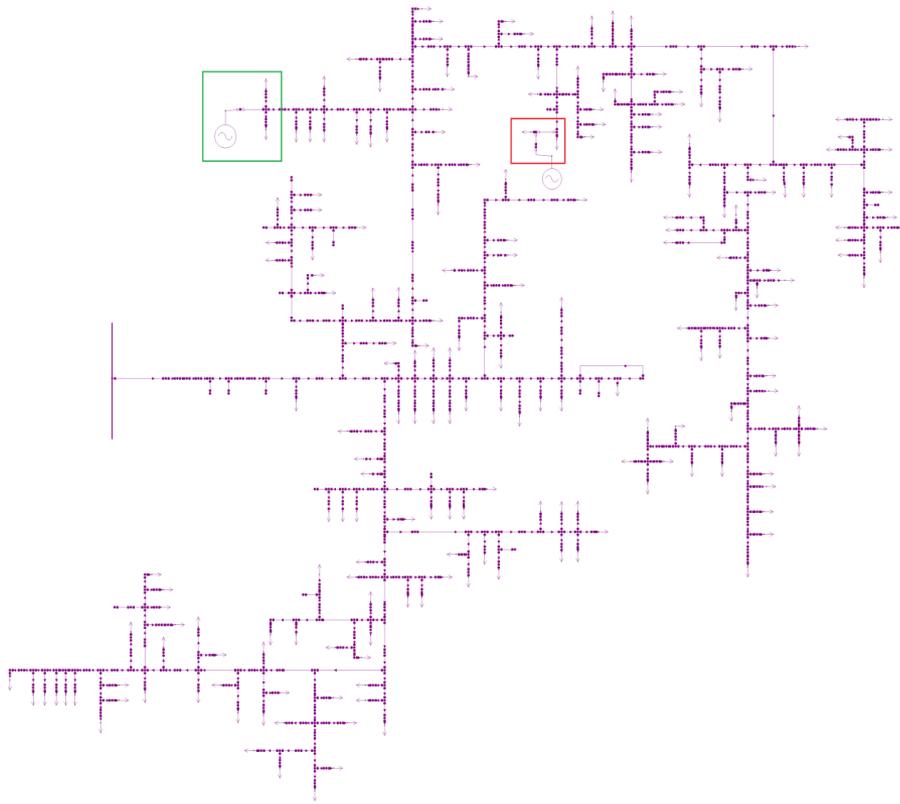


GD Rural. Tomado de Alatoz Energy Systems
<http://www.aesystems.es/productos/instalacionesAisladas.html>

- Se debe analizar la viabilidad de implementar GD para alimentar una zona aislada rural del sistema de distribución.
- Para el estudio se deben identificar los principales recursos con que cuenta la región para la implementación de una planta de GD.
- La evaluación económica se debe contrastar con la extensión de redes tomando en cuenta los criterios del reglamento para los planes de expansión de cobertura de los OR y adaptando los beneficios de la GD.

GD Rural

Sistema de distribución Yacopí



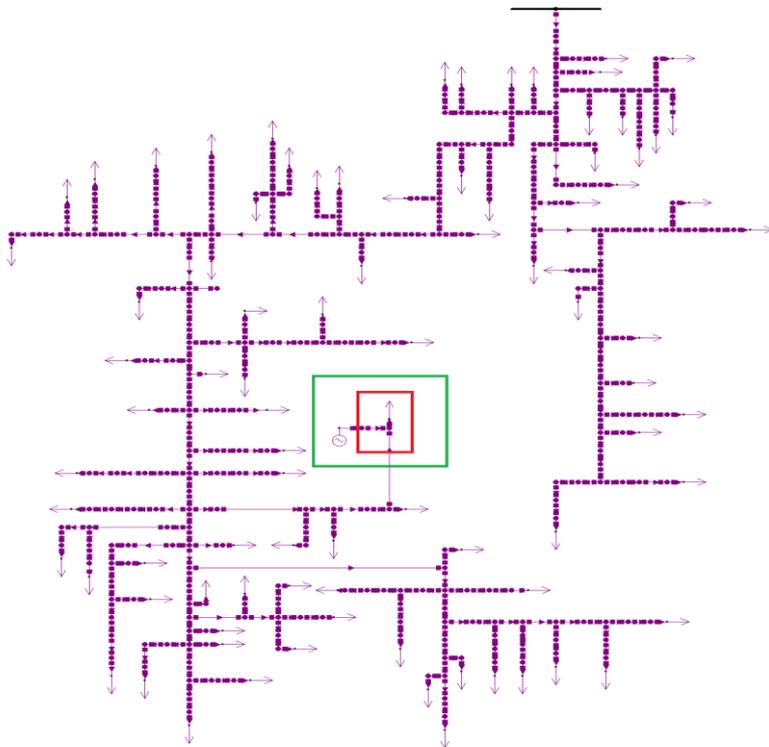
Datos generales del sistema

- Nombre del circuito: Yacopí
- Carga del circuito: 412 kW
- S/E alimentadora: La Palma 34,5 kV
- Capacidad Transformador 5MVA
- Carga La Palma: 1,054 MW
- Nombre del generador: PCH Yacopí
- Generador: Pequeña Central Hidroeléctrica (Sincrónico)
- Capacidad PCH: 442 kW
- Longitud extensión de red: 33 km
- Longitud conexión PCH: 17 km
- Longitud interconexión PCH: 15,15 km

GD Rural



Sistema de distribución Nimaima

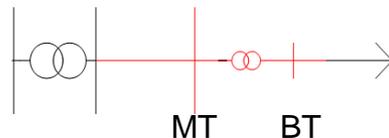


Datos generales del sistema

- Nombre del circuito: Zumbe
- Carga del circuito: 252 kW
- S/E alimentadora: Juratena 34,5 kV
- Capacidad Transformador 1,7 MVA
- Carga Juratena: 0,252 MW
- Nombre del generador: PCH Nimaima
- Generador: Pequeña Central Hidroeléctrica (Sincrónico)
- Capacidad PCH: 195 kW
- Longitud extensión de red: 9,66 km
- Longitud conexión PCH: 3 km
- Longitud interconexión PCH: 3 km

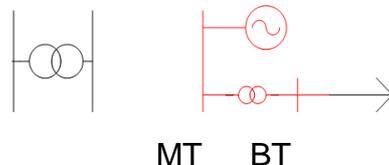
Casos de estudio

- Ampliación de cobertura con extensión de redes



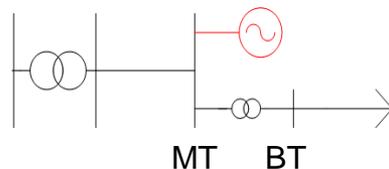
- Construcción de red MT.
- Adquisición Transformador MT-BT.
- Construcción de red BT.

- Ampliación de cobertura con GD



- Adquisición planta GD.
- Construcción de red MT GD.
- Adquisición Transformador MT-BT.
- Construcción de red BT.

- Aumento en la confiabilidad del sistema y calidad de la potencia



- Adquisición planta GD.
- Construcción de red MT GD.

GD Rural



Análisis económico

Caso de estudio	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Extensión de redes		+	+	+		-			-
GD Aislada			+	+	+				
GD Interconectada				+	+		+	+	

1	Demanda calculada con mínimo consumo de subsistencia
2	Precio de Generación y Transmisión
3	Precio de uso de redes de Distribución (MT, BT)
4	Valoración de construcción de nueva red
5	Costo nivelado de energía
6	Aumento de pérdidas en la red
7	Disminución de pérdidas en la red
8	Aumento de vida útil del transformador
9	Pérdida de vida útil del transformador

GD Rural

Resultados económicos Yacopí

Costo medio de Generación Distribuida	
Tipo de costo	\$/kWh
Distribución I-II	99,1
Construcción red nueva (17km)	22,814
Planta PCH	173
Costo medio total	294,914

Costo medio de GD interconectada	
Componente económico	\$/kWh
Ahorro por reducción de pérdidas	13,67
Ahorro por aumento vida útil del transformador	0,8
Planta PCH	173
Construcción red nueva	20,33
Costo medio total	178,86

Costo medio de Extensión de redes	
Tipo de costo	\$/kWh
Generación	112,4
Transmisión	21,43
Distribución I-II	99,1
Aumento de pérdidas	19,58
Aumento vida del transformador	0
Construcción red nueva (33km)	44,286
Costo medio total	296,796

GD Rural

Resultados económicos Nimaima

Costo medio de Generación Distribuida	
Tipo de costo	\$/kWh
Distribución I-II	99,1
Construcción red nueva (3km)	9,13
Planta PCH	173
Costo medio total	281,23

Costo medio de GD interconectada	
Componente económico	\$/kWh
Ahorro por reducción de pérdidas	12,98
Ahorro por aumento vida útil del transformador	1
Planta PCH	173
Construcción red nueva (3km)	9,13
Costo medio total	168,15

Costo medio de Extensión de redes	
Tipo de costo	\$/kWh
Generación	112,4
Transmisión	21,43
Distribución I-II	99,1
Aumento de pérdidas	12,98
Aumento vida del transformador	0
Construcción red nueva (9.6km)	29,39
Costo medio total	275,23

Gracias