Universidad de los Andes

Redes Inteligentes y Generación Distribuida

SILICE

Universidad de los Andes

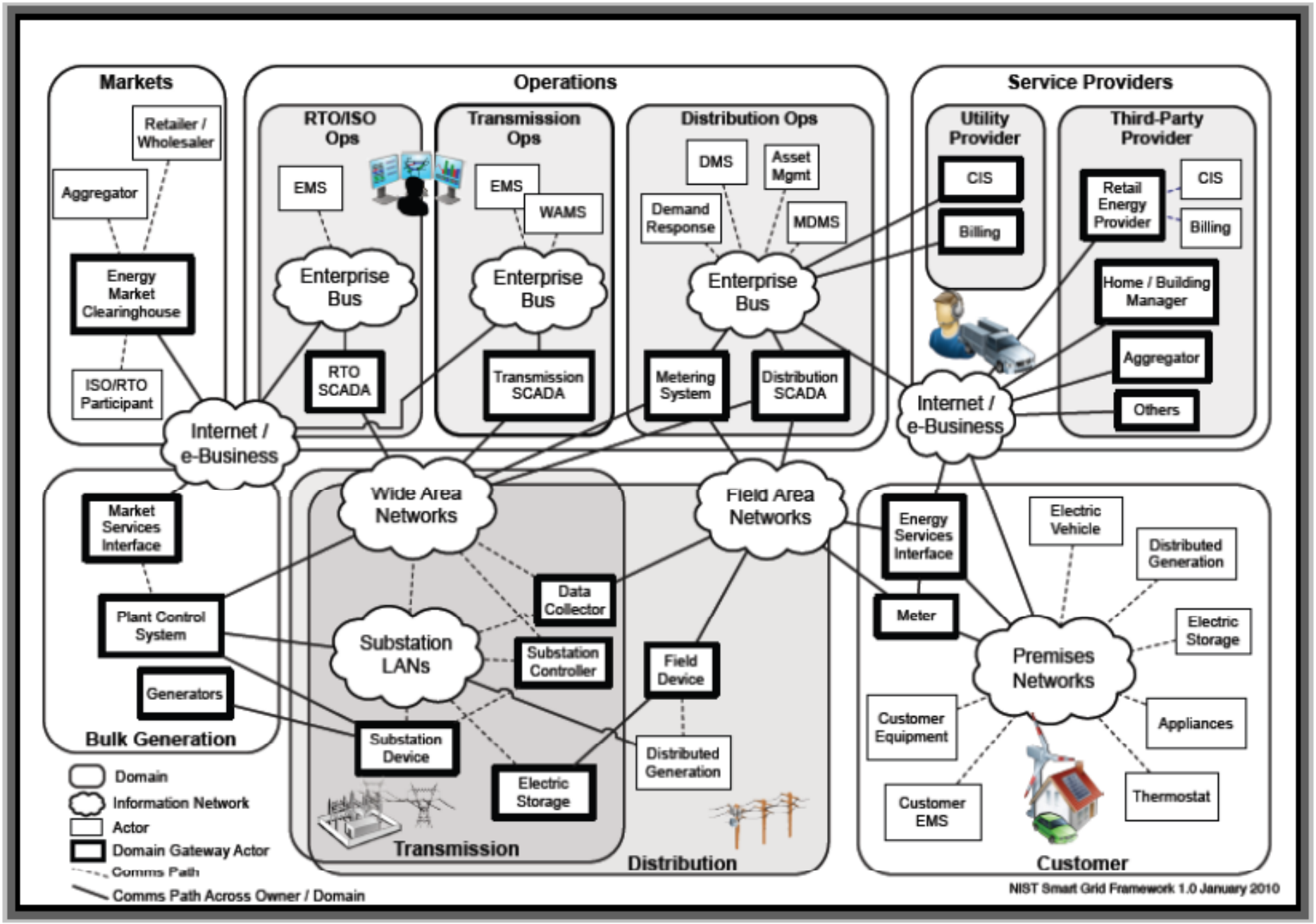
Equipo de trabajo

- Universidad de los Andes
  - Roberto Bustamante, **Ángela Cadena**, Fernando Jiménez, Fernando Lozano, Nicanor Quijano, Gustavo Ramos, Mario Ríos.
  - A.Acuña, J.M.Aranda, L.Beltrán, J.D.Chaves, A.Esguerra, J.G.García, C.Macana, D.Muñoz, C.Murcia, H.Narvaez, G.Obando, A.Pantoja, O.Ramírez, C.Rodríguez, M.Rodríguez, M.Ruiz, C.Táutiva, M.Velásquez,C.Viteri.
- Universidad Nacional de Colombia
  - Gerardo Gordillo, Horacio Torres.
  - Ana María Blanco, Julián Aristizábal, Johan Hernández, Luis Luna.
- Universidad Industrial de Santander
  - Gerardo Latorre.
- Asesores: Alberto Rodríguez y anteriormente Luis I. Betancur

Universidad de los Andes

Agenda

- Introducción
- Retos tecnológicos para las redes inteligentes
  - Estudios de ubicación
  - Sistemas de control
  - Telecomunicaciones
- Red piloto
  - Fuentes, circuito y monitoreo
  - Normatividad
  - Monitoreo - SCADA
  - Regulación económica
- Formación



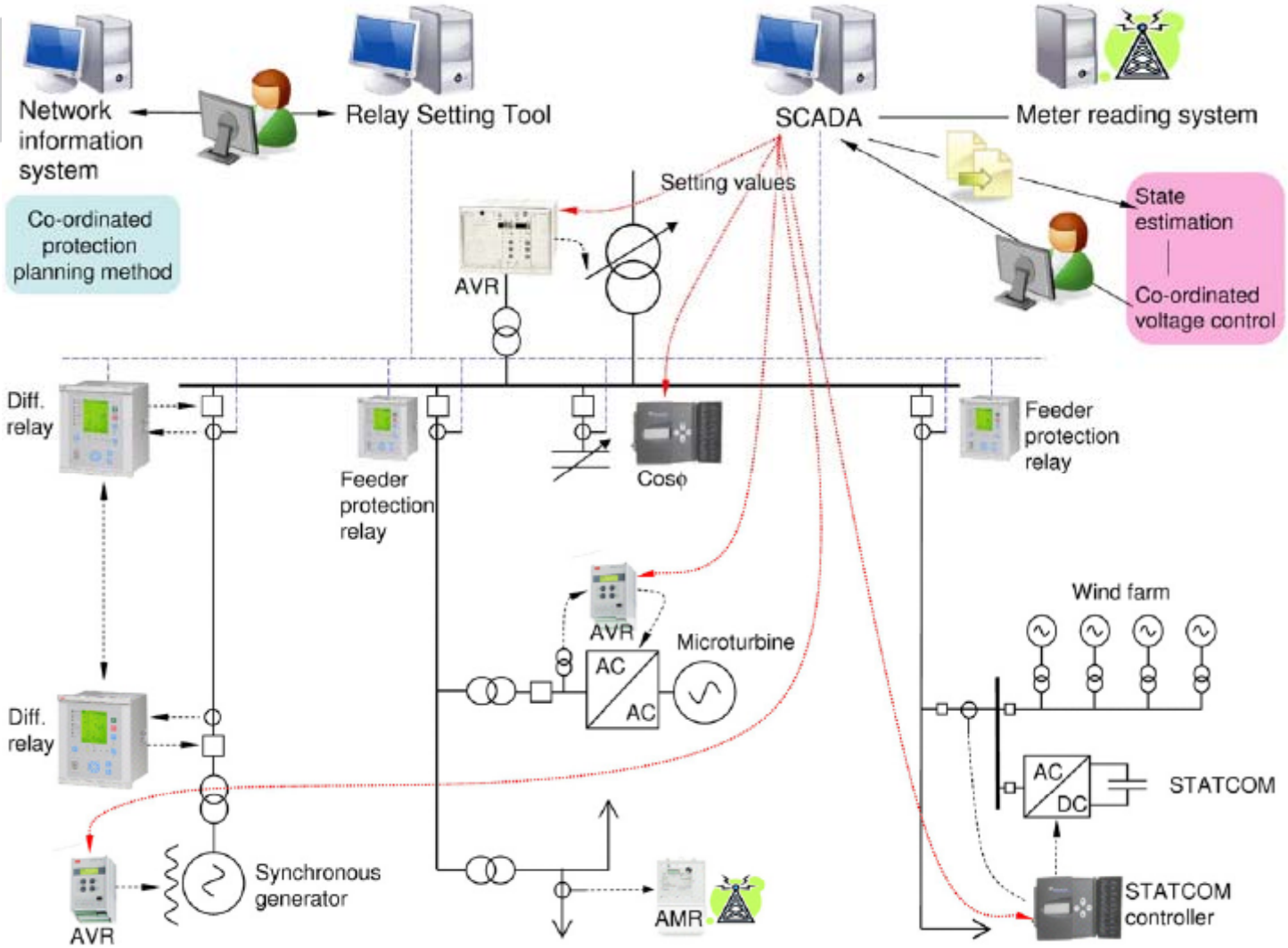
NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 1.0∗ , January 2010

Universidad de los Andes

Existing Grid	Intelligent Grid
Electromechanical	Digital
One-Way Communication	Two-Way Communication
Centralized Generation	Distributed Generation
Hierarchical	Network
Few Sensors	Sensors Throughout
Blind	Self-Monitoring
Manual Restoration	Self-Healing
Failures and Blackouts	Adaptive and Islanding
Manual Check/Test	Remote Check/Test
Limited Control	Pervasive Control
Few Customer Choices	Many Customer Choices

H.Farhangi, The Path of the Smart Grid, IEEE Power & Energy Magazine, Vol 8, Num 1, pp 18-28, 2010

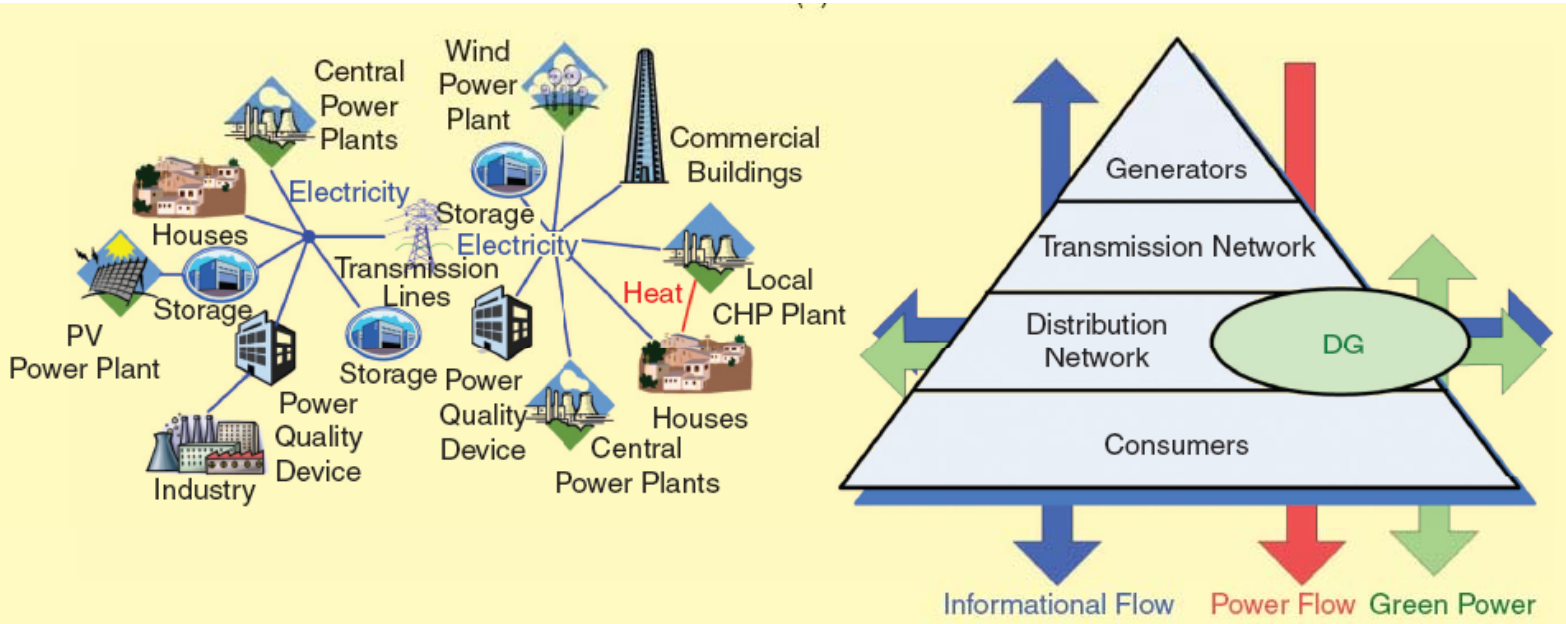
Universidad de los Andes



Smart grid power system control in distributed generation environment, Jarventausta P, Repo S, Rautiainen A, et al., ANNUAL REVIEWS IN CONTROL , Vol 34, Num 2, pp 277-286 , 2010 .

GD - Definiciones

- "La Generación Distribuida es la generación conectada a un Sistema de Distribución Local (SDL), que no tiene acceso directo a la red de transmisión y cumple con los requerimientos de conexión" (Proyecto Colciencias – Isagen - Uniandes – Unal)
- "[E]s la generación conectada a un Sistema de Distribución Local (red radial), que no tiene acceso directo a la red de transmisión, y no es despachada centralmente y cumple con los requerimientos de conexión". (Proyectos Colciencias – Codensa-Uniandes – Unal – UIS)



Guerrero, J.M., Blaabjerg, F, Zhelev, T, Hemmes, K, Monmasson, E, Jemei, S, Comech, M.P, Granadino, R, and Frau, J.I., Distributed Generation: Toward a New Energy Paradigm, IEEE Industrial Electronics Magazine, 2010. Vol.4,(1), pp.52 -64.

Universidad de los Andes

GD- Ventajas y desventajas (retos)

(Pepermans et al., 2005 y otros autores)

- Reducción de pérdidas en las redes de transmisión y distribución.
- Incremento en la confiabilidad y en calidad del servicio si se cumplen las reglamentaciones.
- Mayor control de energía reactiva y regulación de voltaje.
- Retraso de inversiones en redes de transmisión y subtransmisión.
- Mejor adaptación a las variaciones de la demanda.
- Aumento de la competencia y disminución del poder de mercado.
- Mayor flexibilidad al disminuir la dependencia del sistema centralizado.
- Uso eficiente de la energía e incorporación de fuentes más limpias.

- Requerimiento de nuevos esquemas para la operación y el mantenimiento de este tipo de sistemas.
- Mayores costos de inversión, especialmente para algunas tecnologías renovables.
- Cargos de conexión y uso que deben pagar los productores.
- Mayor descentralización que puede dificultar la garantía de seguridad del sistema e incluso incrementar los costos de operación.
- Contaminación auditiva y ambiental cerca de los consumidores, en algunos casos.

Universidad de los Andes

Trabajos Previos

- "Cogeneración en el sector azucarero aplicando el enfoque ESCO"
  - Se evaluó la cogeneración (una forma de GD)
    - Financiado por PNUD - ASOCAÑA – Ministerio de Medio Ambiente – UPME
- "Regulación para incentivar las energías alternas y la generación distribuida en Colombia"
  - Se revisaron otras formas y tecnologías de GD
  - Se estudió la forma de integrarlas al mercado eléctrico
  - Se identificaron ajustes regulatorios para esto
    - Universidad Nacional, Universidad de los Andes, Isagen, Colciencias

Universidad de los Andes

GD y RI en el Sistema Colombiano

- Beneficiarios
  - Generadores (desarrolladores nuevos, ¿anteriores?)
  - Transportadores (?)
  - Distribuidores
  - Consumidores (industriales, comerciales, urbanizaciones y viviendas)
  - Zonas aisladas
  - Mercado en general
- Se requerirían algunos ajustes al marco regulatorio actual y la expedición de una normatividad técnica y ambiental adecuada a este tipo de sistemas.

Universidad de los Andes

Cambio Técnico en la Industria Eléctrica

- Profundización de los mercados con mayor participación de la demanda y mayor número de agentes.
  - Orientación de negocios en esta actividad (reducción de pérdidas y mejoras de confiabilidad).
  - Mayores exigencias de calidad, confiabilidad y cobertura.
  - Preocupación por el uso eficiente de energía y reducción de pérdidas
- Requerimientos específicos
  - Renovación de redes.
  - Mejoras en el servicio y niveles de cobertura.
- Reducción de tamaño y costo de las plantas de generación y mayor participación de fuentes limpias.
  - Seguridad energética.
  - Metas ambientales.
  - Diversificación de la canasta.
  - Producción industrial y desarrollo tecnológico local.

Universidad de los Andes

Cambio Técnico en Industrias Relacionadas

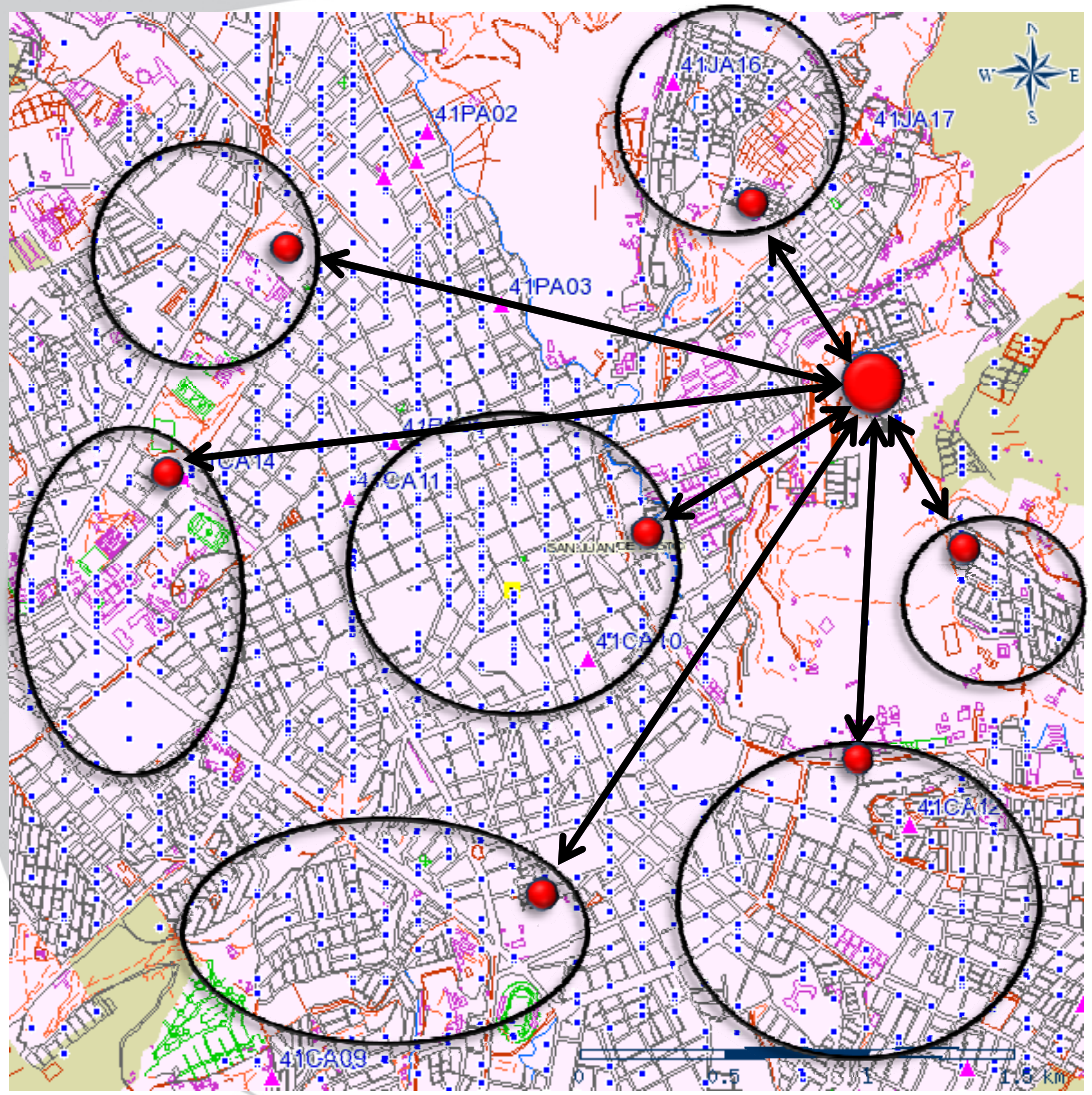
- Equipamiento ‘inteligente’ (AMR, AMI)
- Tracción eléctrica.
- Electrónica de potencia.
- Detección de fallas.
- Telecomunicaciones: información del negocio de distribución (operativa y comercial).
- Algoritmos y técnicas que consideran múltiples agentes.
- Informática: modelos de información estandarizados, metamodelos y cloud/grid computing.

Universidad de los Andes

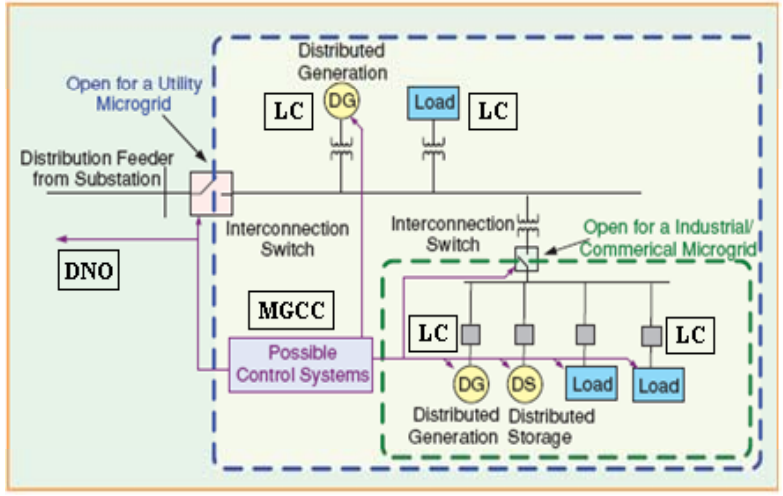
¿Por qué son importantes las RI para Colombia?

1. Eficiencia energética (reducción de pérdidas).
2. Continuidad y calidad del servicio.
3. Confiabilidad y seguridad del suministro.
4. Gestión comercial.
5. Participación de la demanda → usuarios más sofisticados.
6. Gestión de activos.
7. Mayor número de agentes en el mercado.

Sistemas de Gran Escala, Distribuidos y Jerárquicos



Incorporar microgrids como subsistemas



Adaptado de: Kroposky, B et al. Making Microgrids Work. IEEE Power & Energy Magazine. May/Jun 2008

Universidad de los Andes

Retos tecnológicos

- Ubicación y dimensionamiento de GD
- Seguridad y estabilidad
- Sistemas y estrategias de control
- Sistemas de telecomunicaciones
- Manejo de información
- Medición avanzada y respuesta de la demanda

Problema de Ubicación

- **Función objetivo**
  - Min (Costos totales) Min (Pérdidas)
  - Max (RBC) Max (P_{GD} instalada)
- **Restricciones**
  - Perfil de voltaje
  - Límites térmicos de los elementos (sobrecargas)
  - Nivel de confiabilidad
  - Cantidad y/o tamaño de las unidades de GD
  - Ecuaciones de balance
  - Presupuesto
- **Variables de decisión**
  - P_{GD} instalada Ubicación # de unidades de GD

Universidad de los Andes

Formulación del Problema

- El problema se enfoca desde el punto de vista del distribuidor-comercializador.
- Problema de optimización:

$$Max$$

$$RBC = \frac{(EL_0 - EL_{GD}) \cdot MP + \sum_{i=1}^{Ln} (ENS_{0(i)} - ENS_{GD(i)}) \cdot C_{Rac} + \sum_{j=1}^{Nn} E_{GD(j)} \cdot MP}{\sum_{j=1}^{N_n} (P_{ins(j)} \cdot C_{ins} + E_{GD(j)} \cdot C_{op})}$$

$$sujeto\ a:$$

$$P_{ins(j)} \leq P_{Lim} \quad j = 1, 2, ..., N_n$$

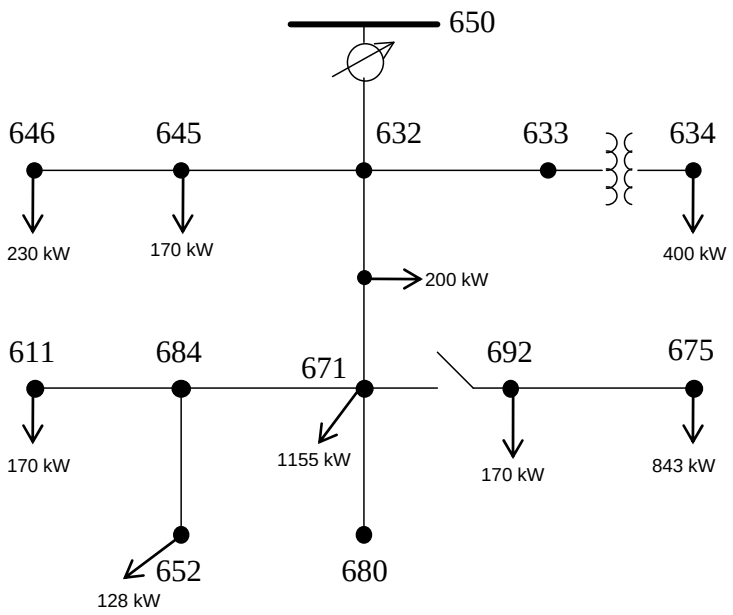
$$V_{min}\,\% \leq V_j\,\% \leq V_{max}\,\% \quad j = 1, 2, ..., N_n$$

$$P_{jk} \leq P_{jk}^{max} \quad j = 1, 2, ..., N_n \quad k = 1, 2, ..., N_n$$

$$\sum_{i=1}^{L_n} ENS_{GD(i)} \leq ENS_{Lim} \quad i - 1, 2, ..., L_n$$

Táutiva, C., Cadena, A. & Rodriguez, F., “Optimal Placement of Distributed Generation on Distribution Networks", The 44th International Universities Power Engineering Conference - UPEC 2009, Glasgow, Scotland.

Índices del caso base

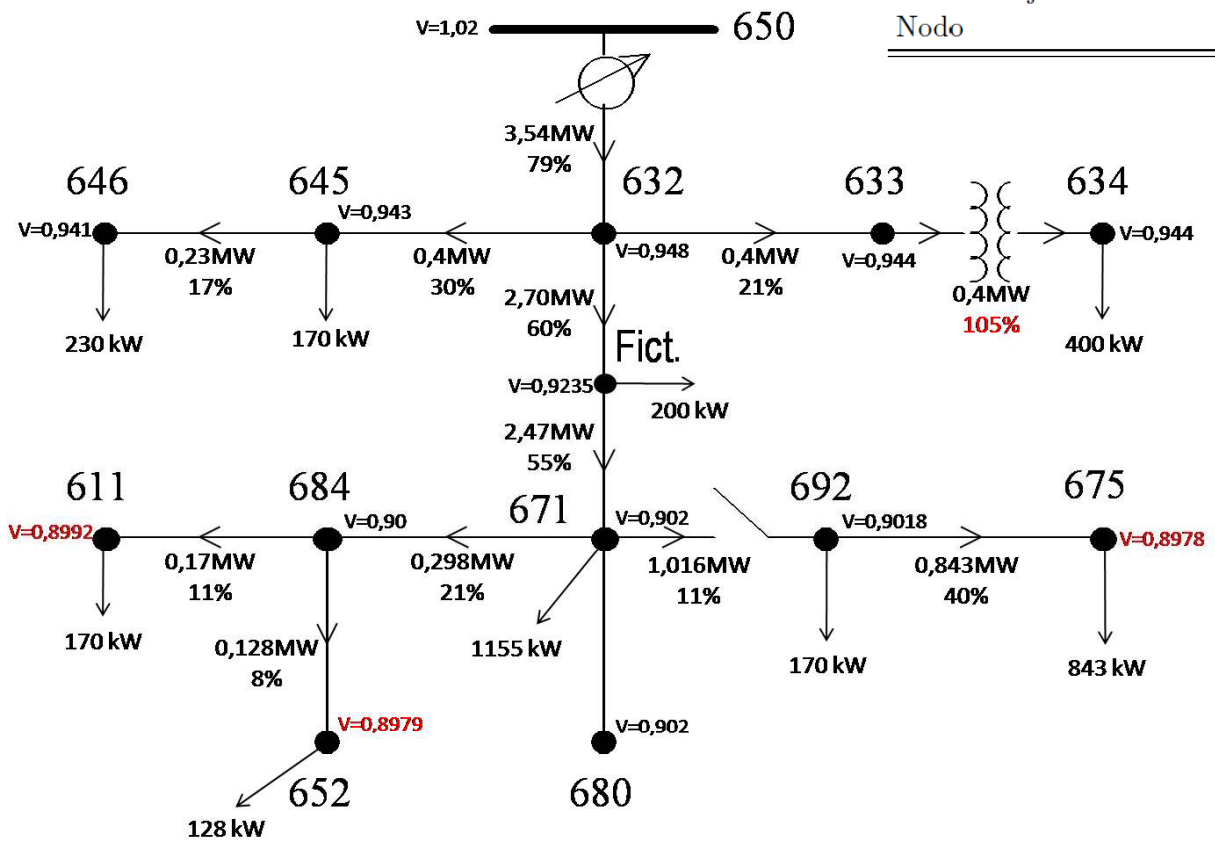


Nodo	Clientes	Carga (kW)
645	217	170
646	227	230
634	254	400
Ficticio	222	200
671	375	1155
692	217	170
675	325	843
652	210	128
611	217	170
Total	2264	3466

Elemento	Tipo	Longitud (ft)	Longitud (km)	λ (fallas/año)	r (horas)
650-632	Troncal	2000	0,6096	0,06096	4
632-Ficticio	Troncal	1000	0,3048	0,03048	4
Ficticio-671	Troncal	1000	0,3048	0,03048	4
671-680	Troncal	1000	0,3048	0,06096	2
632-645	Lateral	500	0,1524	0,03048	2
645-646	Lateral	300	0,09144	0,018288	2
632-633	Lateral	500	0,1524	0,03048	2
633-634	Transformador	-	-	0,0321	5
671-692	Interruptor	-	-	0,0321	3
692-675	Lateral	500	0,1524	0,03048	2
671-684	Lateral	300	0,09144	0,018288	2
684-652	Lateral	800	0,24384	0,048768	2
684-611	Lateral	300	0,09144	0,018288	2

Índices del caso base

Índices del *caso base*	Valor
Potencia de pérdidas (kW)	212
ENS (kWh-año)	2296
SAIDI (h/cliente-año)	0,65
SAIFI (Interrupciones/cliente-año)	0,44
Peor voltaje	89,78 %
Nodo	675



Universidad de los Andes

Automatización de la Distribución (Redes Inteligentes)

- Aplicaciones asociadas a las Tecnologías de la Información.
- Sistemas SCADA.
- Control local de generadores distribuidos.
- Manejo de las protecciones del sistema.

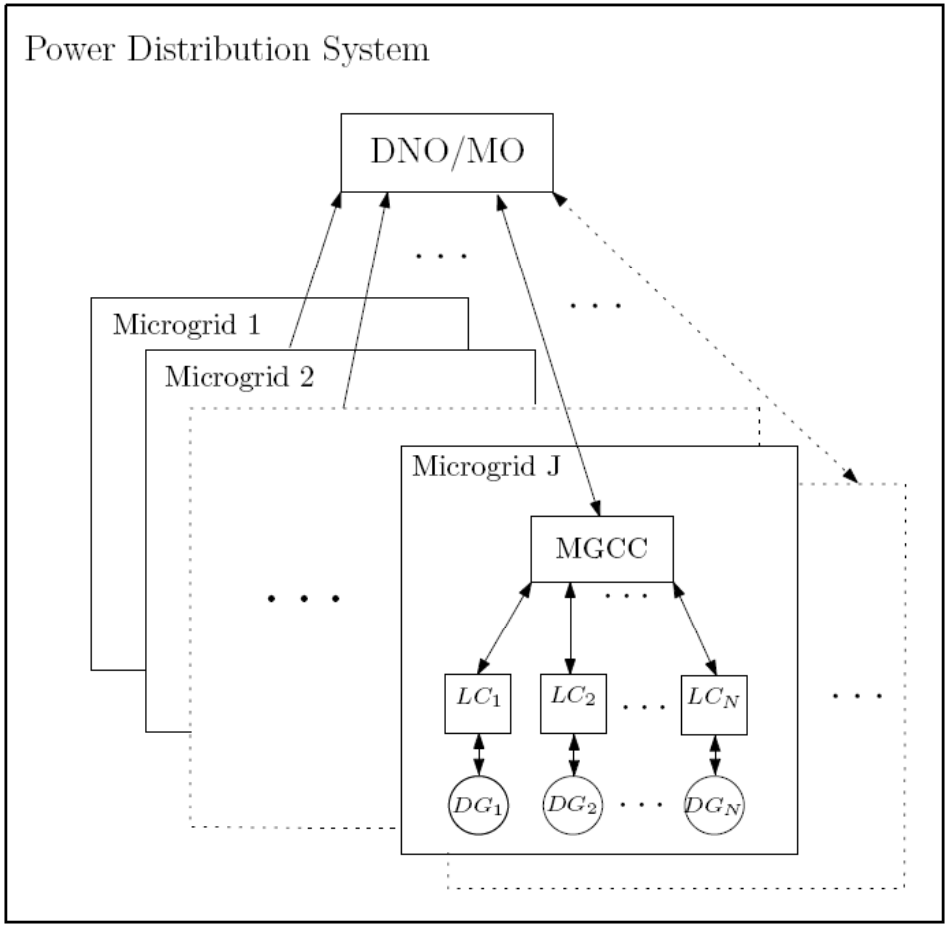
Estrategias de Control en Despacho de GD

Control Centralizado

- Necesita un modelo muy aproximado del sistema.
- A pesar de ser un sistema muy exitoso, necesita una herramienta de optimización que generalmente no corre en tiempo real (OPF).

Control Distribuido ✓

Esquema del Sistema de Distribución, Agentes y Estrategias



Estrategias de Despacho (Sistemas Multiagente)

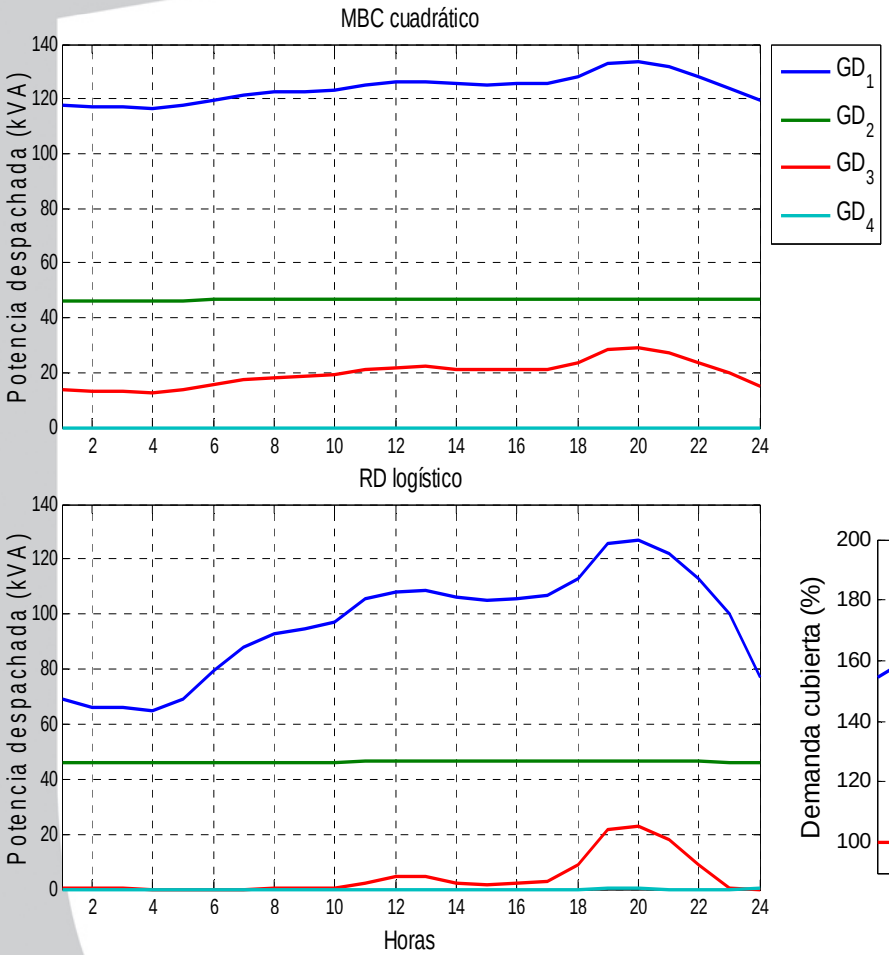
Control Basado en Mercados

Replicator Dynamics

- DNO/MO: Distribution network operator / Market operator
- MGCC: Microgrid central controller
- LC: Local controllers
- DG: Distributed Generators

A.Pantoja and N.Quijano, "A Population Dynamics Approach for the Dispatch of Distributed Generators", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, *PP*, 1-9

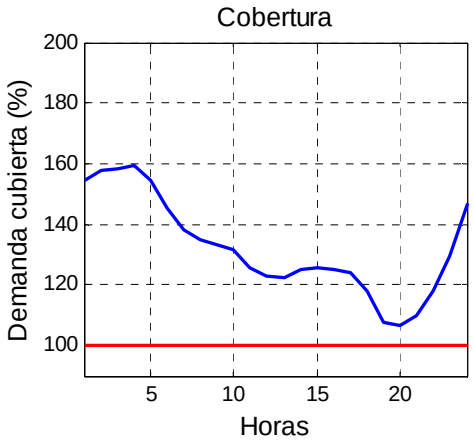
Algunos Resultados

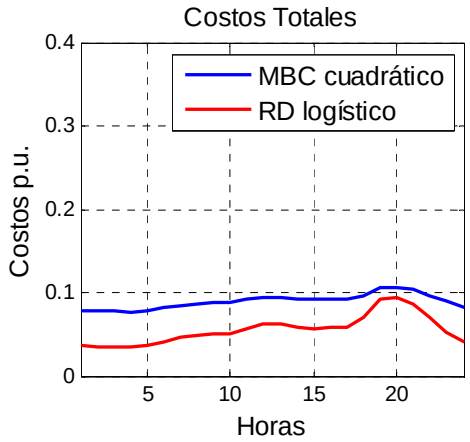


Parámetros:

$$p_n = [172.4\ 47.2\ 66.1\ 106.8]\ \text{kVA}$$

$$c_n = [0.2\ 0.01\ 0.5\ 1]\ \text{pu} \qquad d_f = 0.5$$





A.Pantoja and N.Quijano, "A Population Dynamics Approach for the Dispatch of Distributed Generators", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **2011**, *PP*, 1-9

Universidad de los Andes

Telecomunicaciones como parte integral de las *"Smart Grids"*
¿Qué estamos haciendo en SILICE?

- Evaluación de los protocolos de la capa de aplicación: DLMS/COSEM, DNP3, IEC 61850, IEEE C37.118
- Evaluación de protocolos de las capas de enlace de datos y física
- Mediciones BPL (Gateways MV Corinex)
- Pruebas *"smart meters"*

Universidad de los Andes

Evaluación de los protocolos de la capa de aplicación: DLMS/COSEM, DNP3, IEC 61850, IEEE C37.118

- DLMS/COSEM. Comunicaciones entre medidores inteligentes y centro de operaciones.
- DNP3. Comunicaciones entre SCADA y RTUs
- IEC 61850. Comunicaciones en subestaciones
- IEEE C37.118. Entre otras funciones, realiza formato de transmisión de datos y protocolo para comunicación de datos en tiempo real entre centro de control y PMUs

Universidad de los Andes

Evaluación de los protocolos de la capa de aplicación: DLMS/COSEM, DNP3, IEC 61850, IEEE C37.118

Metodología seguida:

- Revisión del estado del arte: Búsqueda en base de datos IEEE y publicaciones sectoriales, para entender mejor los protocolos, el contexto donde funcionan, su desempeño, y para validación.
- Búsqueda y estudio de las normas y estándares correspondientes.
- Determinar si estos protocolos ya están disponibles en NS2, OPNET, Qualnet
- Codificación de los protocolos: Identificación de las partes de la norma que es necesario codificar dependiendo de qué se busca.
- Integración en NS2 (y/o OPNET) junto con “parches” correspondientes
- Validación del simulador que resulta
- Interactuar con las otras disciplinas (Energía, potencia, control, economía, regulación, etc.)
- ***Desarrollar un plan de evaluaciones del desempeño (simulaciones) para lograr una comprensión amplia (variar metódicamente, los valores de los parámetros, agregar o cambiar opciones y sobre escenarios físicos realistas e interesantes (colombianos principalmente).***
- Publicar

Universidad de los Andes

Evaluación de protocolos de las capas de enlace de datos y física

- *Tecnologías de radio o inalámbricas como LTE, HSDPA, WiMAX , WiFi.*
- *BPL basado en la norma OPERA* (http://www.ist-opera.org)
- *EPON basado en la norma IEEE 802.3 o GPON ITU-T 984*
- *Ethernet*

La red internet (TCP/UDP/IP) se mantiene, pero aparecen nuevos protocolos (MPLS por ejemplo)

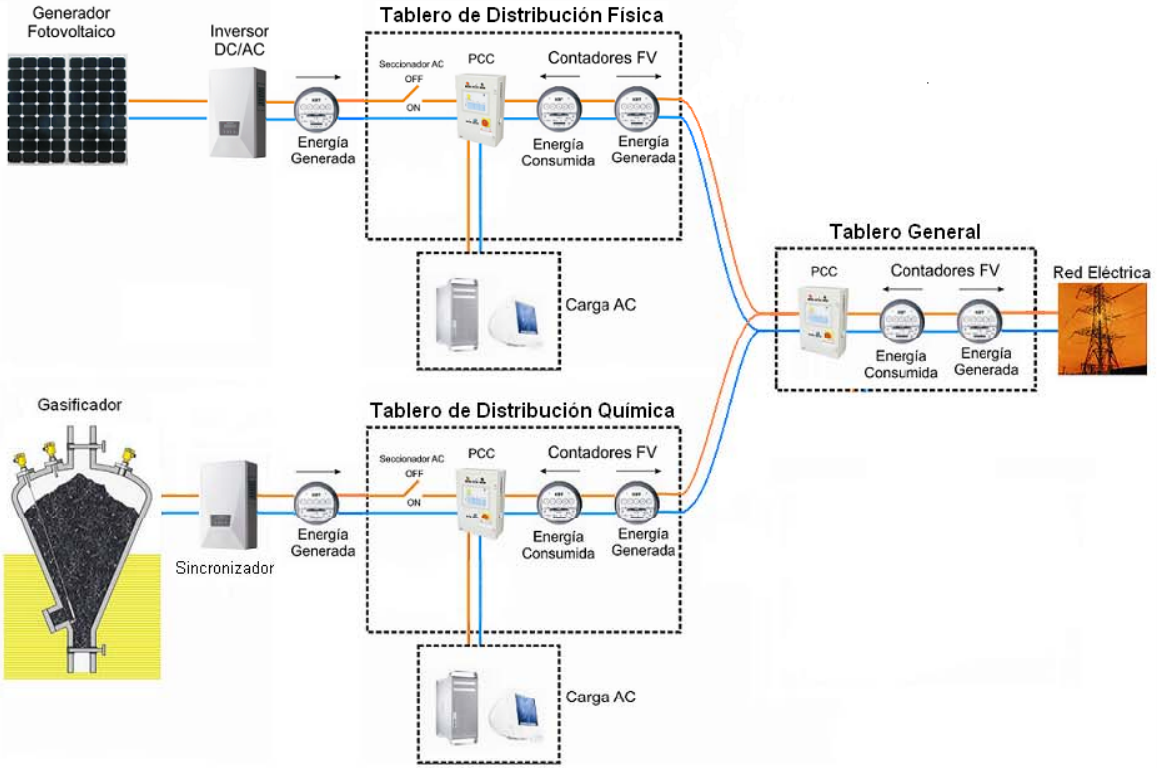
Universidad de los Andes

MEDIDORES INTELIGENTES

- **Medidor inteligente de la empresa Meter USA**
  - Ethernet con Puerto RJ-45, TCP y HTTP
  - Precio: USD 705 aproximadamente (http://www.metersusa.com/Accuenergy/SmartEnergy.htm)
- **Medidor inteligente de la empresa Itron**
  - Ethernet, DLMS COSEM, TCP/IP
  - GSM/GPRS (https://www.itron.com/productsAndServices/Pages/ACE8000%20PowerGrid.aspx?market=electricity)
- **Medidor inteligente de la empresa Elester**
  - ZigBee para HAN
  - GSM/GPRS (http://www.elster.com/en/downloads/AS300_Productinfo_02082011_English_Pure.pdf)

Universidad de los Andes

Red Piloto

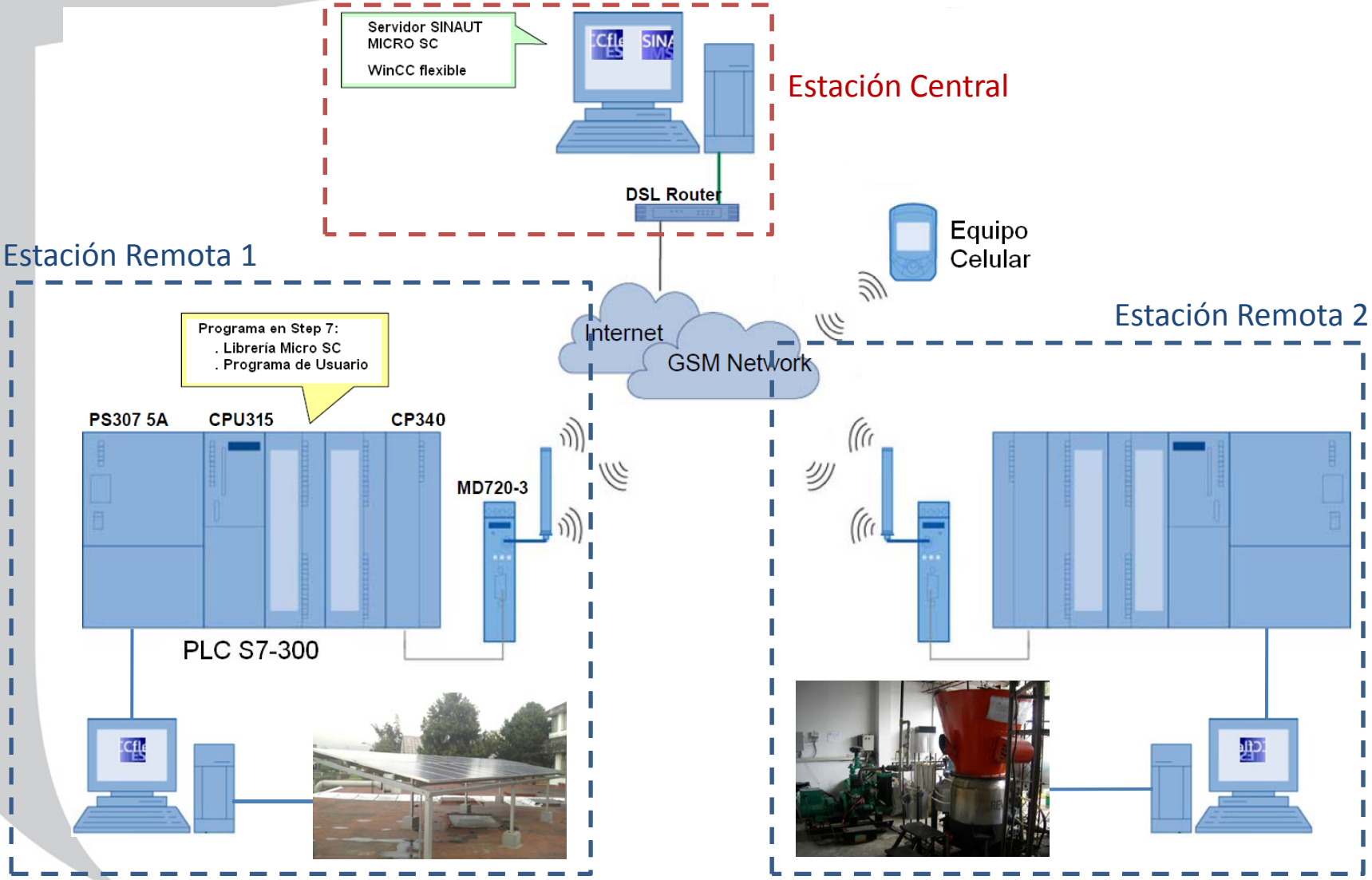


Universidad de los Andes

Estructura

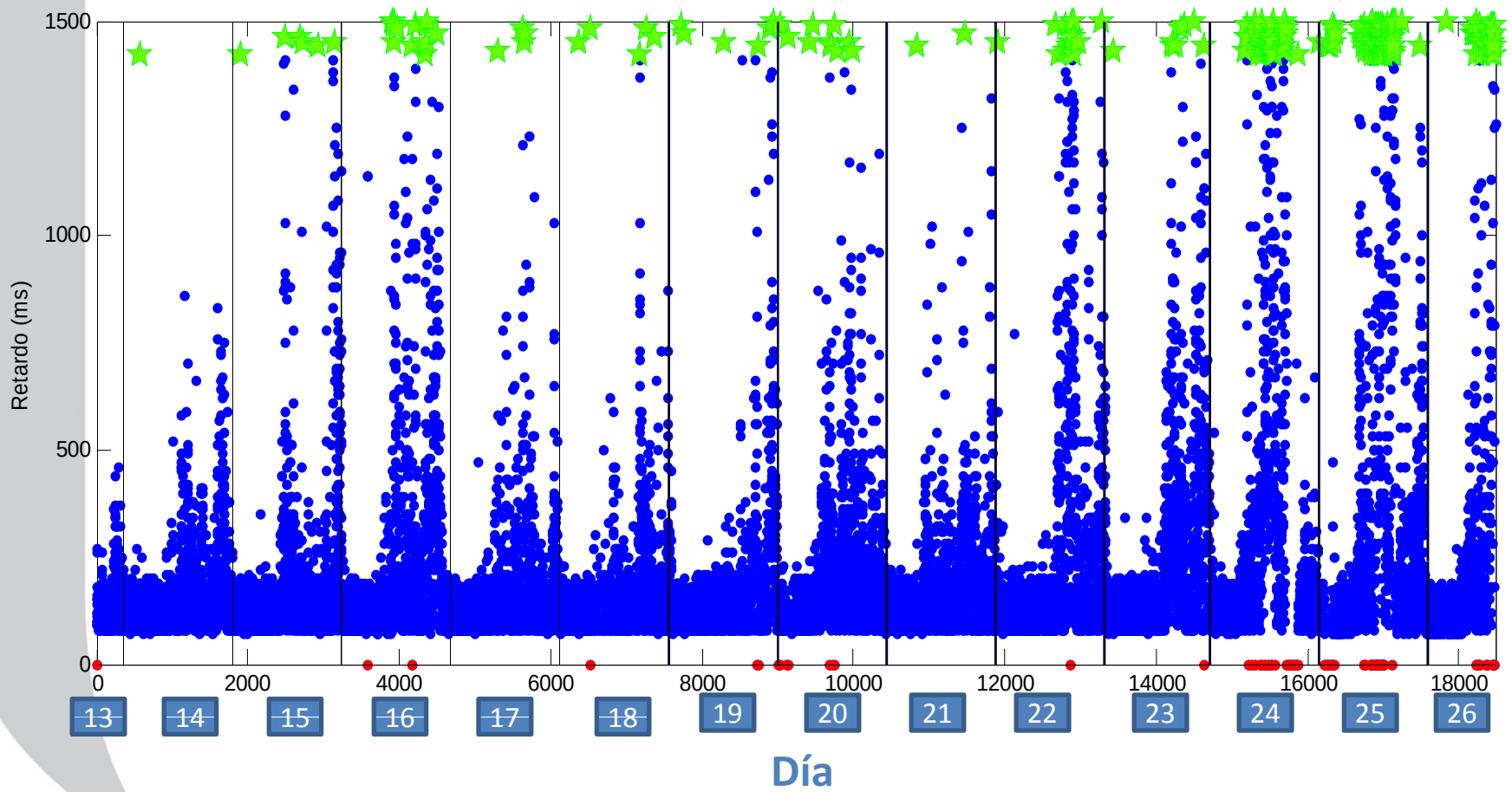
- Un generador fotovoltaico de 3.6 kWp instalado en el edificio de Física de la Universidad Nacional.
- Un generador de biomasa de 15 kW instalado en el edificio de Química y conectados a la red de distribución de Codensa a la altura de la S/E Antonio Nariño.
- Cargas con componentes resistivo y reactivo.
- Dos (2) RTUs móviles basadas en PLCs comerciales (Siemens) ubicadas en cada uno de los generadores.
- Una (1) RTU móvil con funciones de SCADA ubicada en la Universidad de los Andes.
- Comunicaciones basadas en redes publicas de telefonía móvil (GSM, GPRS inicialmente).

Universidad de los Andes



Universidad de los Andes

Prueba de Confiabilidad del Sistema de Comunicaciones

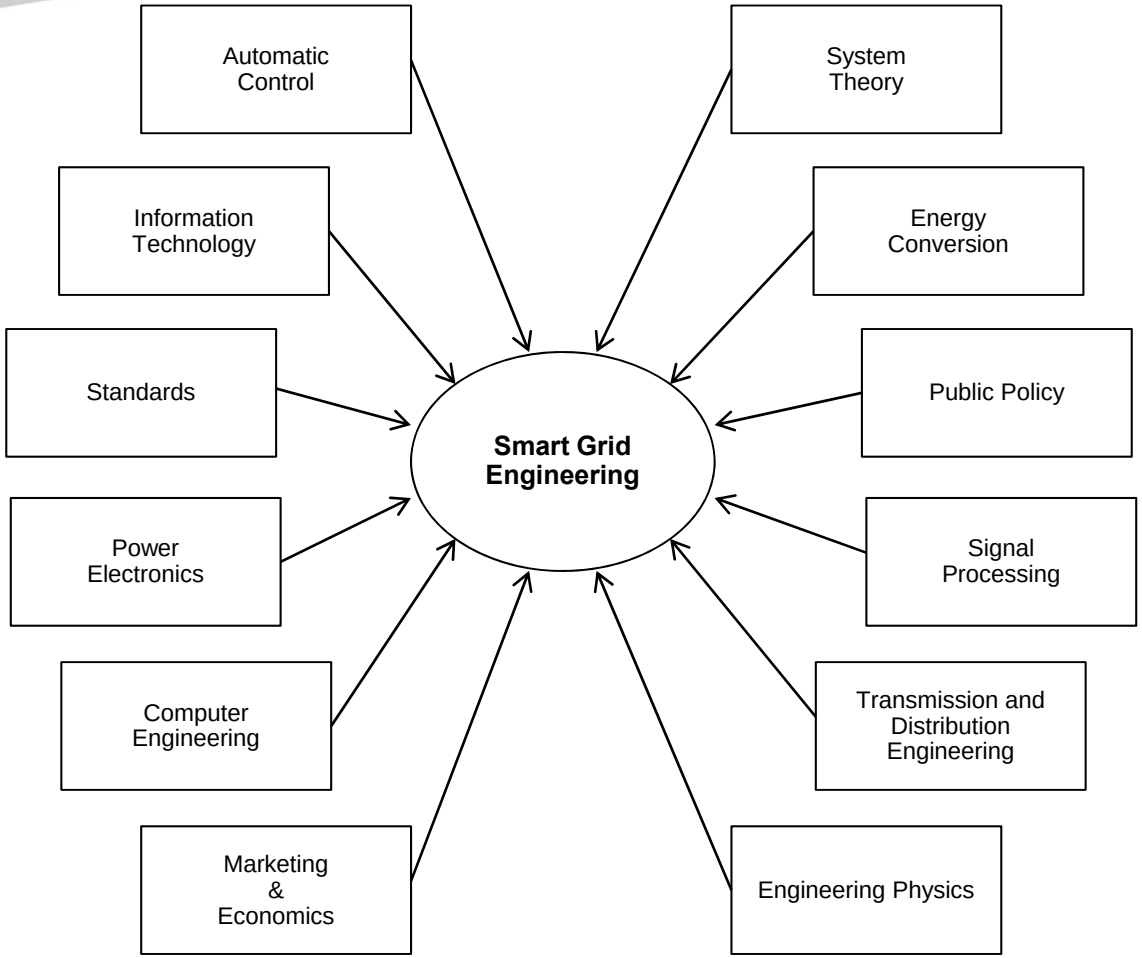


Universidad de los Andes

Prueba de Confiabilidad del Sistema de Comunicaciones

	Diciembre	Enero
Mensajes Enviados	4491	18522
Mensajes Exitosos	4471	17801
Confiabilidad	0.9955	0.9611
Disponibilidad de la red GPRS	1	0.9753

Retos formación



M. Kezunovic, “Teaching the smart grid fundamentals using modeling, simulation, and hands-on laboratory experiments," in IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010, pp. 1-6, IEEE, 2010.

Universidad de los Andes

Formación – Ingeniería Eléctrica

IELE 4113: Redes Inteligentes y Generación Distribuida

- Introducción.
- Tecnologías de generación, monitoreo y supervisión.
- Ubicación e instalación.
- Análisis de sistemas de potencia.
- Estrategias de control.
- Telecomunicaciones.
- Economía, regulación y aspectos ambientales.

Universidad de los Andes

Objetivos del Curso

- Entender los conceptos asociados con las redes inteligentes y la generación distribuida.
- Integrar los temas de diferentes áreas del conocimiento de la Ingeniería Eléctrica (e.g., potencia y energía, sistemas de control, telecomunicaciones y economía y regulación)
- Diseñar y presentar los resultados de una red inteligente en una zona geográfica colombiana utilizando los conceptos de generación distribuida.

Mapas de ruta

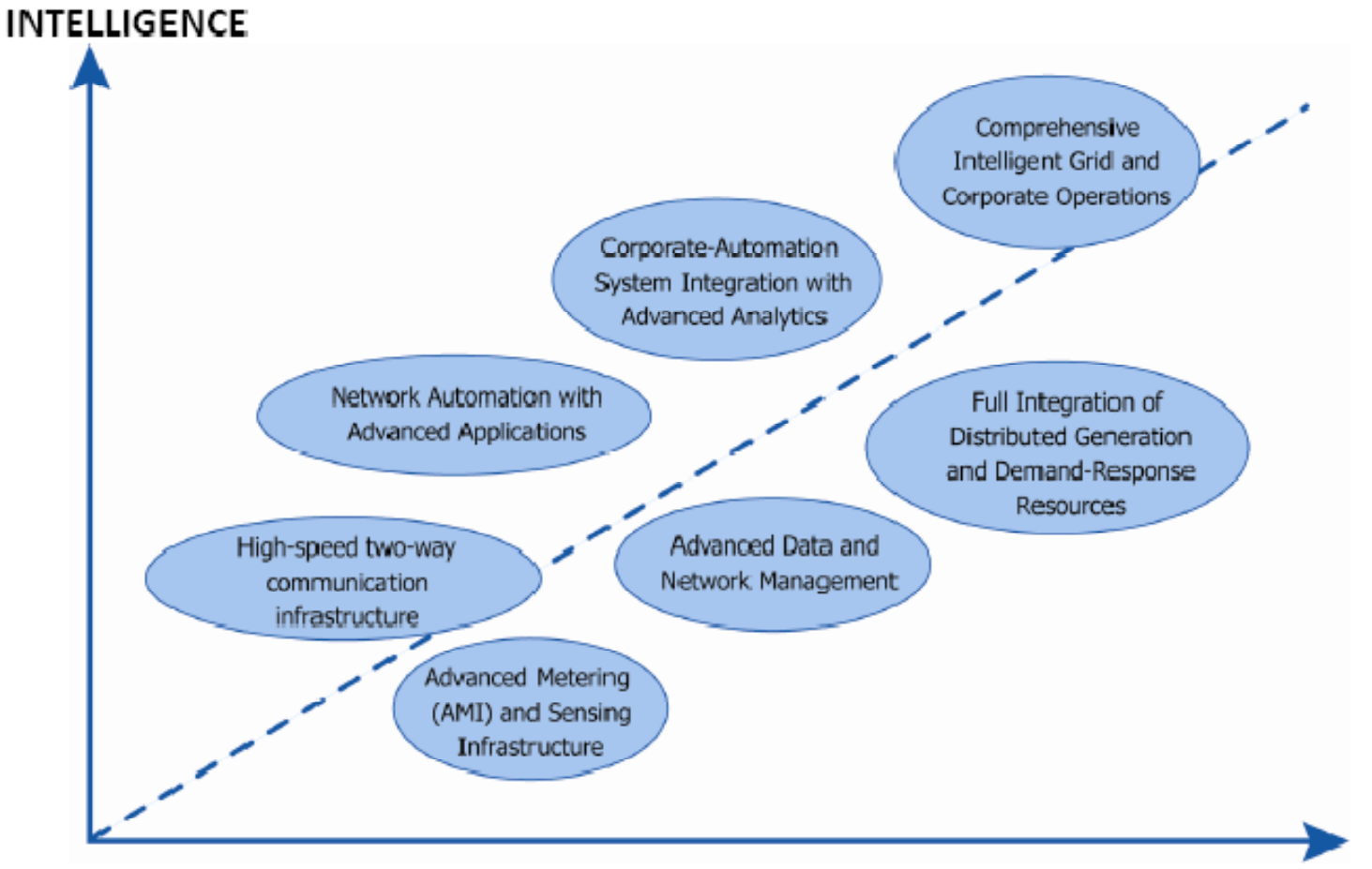


Figure 2-5: Smart Grid Roadmap

OSI, Smart Grid Initiatives, White Paper