



SEPOC + SESP

8º Seminário de Eletrônica de
Potência e Controle

2º Seminário de Energia
e Sistemas de Potência.

24 a 27 de agosto de 2014
Santa Maria - RS - Brasil

Por que precisamos de Redes Elétricas Inteligentes?

mais

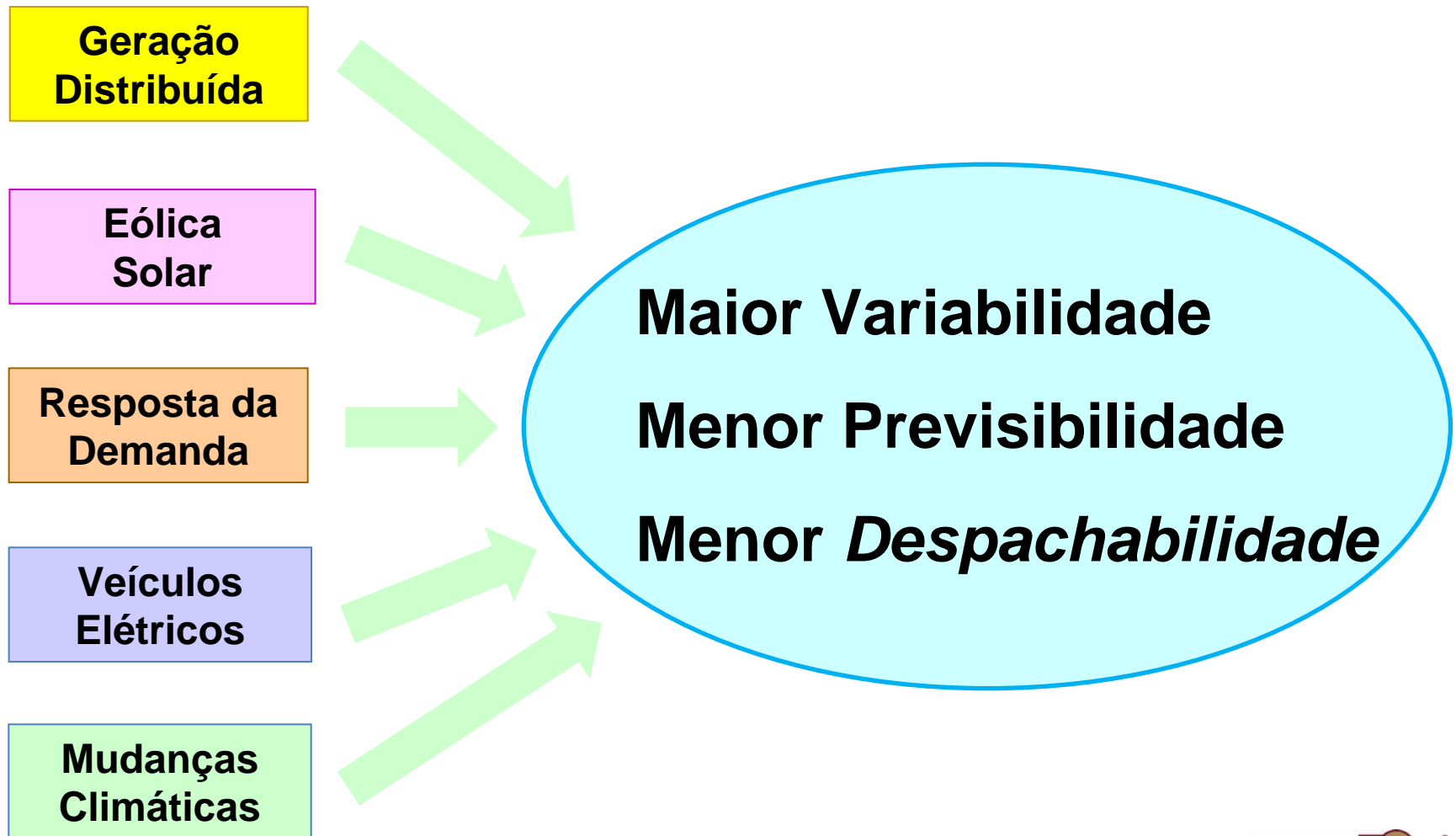
Djalma M. Falcão

falcao@nacad.ufrj.br

Programa de Engenharia Elétrica

COPPE **50+1**
UFRJ

Novo Cenário



Fonte: **EPRI**

Velhas Questões

Ainda relevantes, em alguns países, tais como . . .

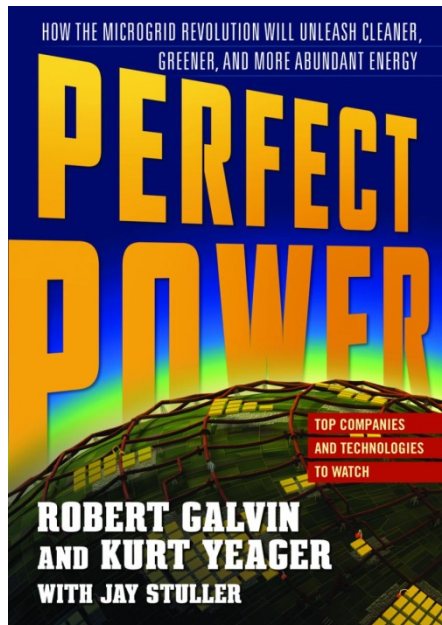
- **Perdas Comerciais (Fraude)**
- **Baixa Confiabilidade**
- **População não totalmente atendida**

Em países desenvolvidos também existem problemas antigos . . .

The Galvin Electricity Initiative



Sad Socket



- Lançado em 2009 (2005)
- Robert Galvin é ex-presidente da Motorola
- Kurt Yeager é ex-presidente do EPRI (Electric Power Research Institute)
- **Afirmações no Livro**
 - O sistema elétrico americano é largamente baseado em tecnologia desenvolvida antes dos anos 1950
 - O sistema atual foi projetado para alimentar lâmpadas, motores, bombas, etc.
 - O mundo *high-tech* não pode mais suportar um sistema de energia elétrica *low-tech*
 - O sistema de energia americano atual é tão incompatível com o futuro da nação quanto as antigas estradas construídas para carroças foram para o automóvel

Resumo

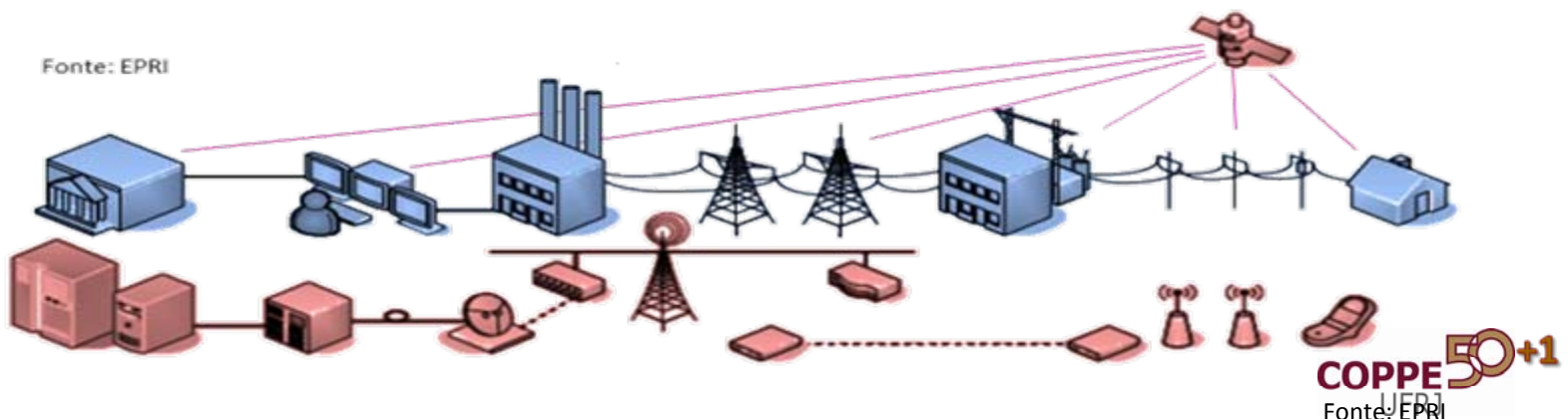
- **Definições**
- **Por que precisamos de REI?**
- **Onde as REI podem nos ajudar?**
- **Tecnologias de REI**
 - Advanced Metering Infrastructure (AMI)
 - Self Healing
 - Controle Coordenado de Tensão
 - Microrredes
 - WAMPAC (PMU)
- **REI no Mundo e no Brasil**
- **Pesquisas na COPPE/UFRJ**

Redes Eléctricas Inteligentes (REI)

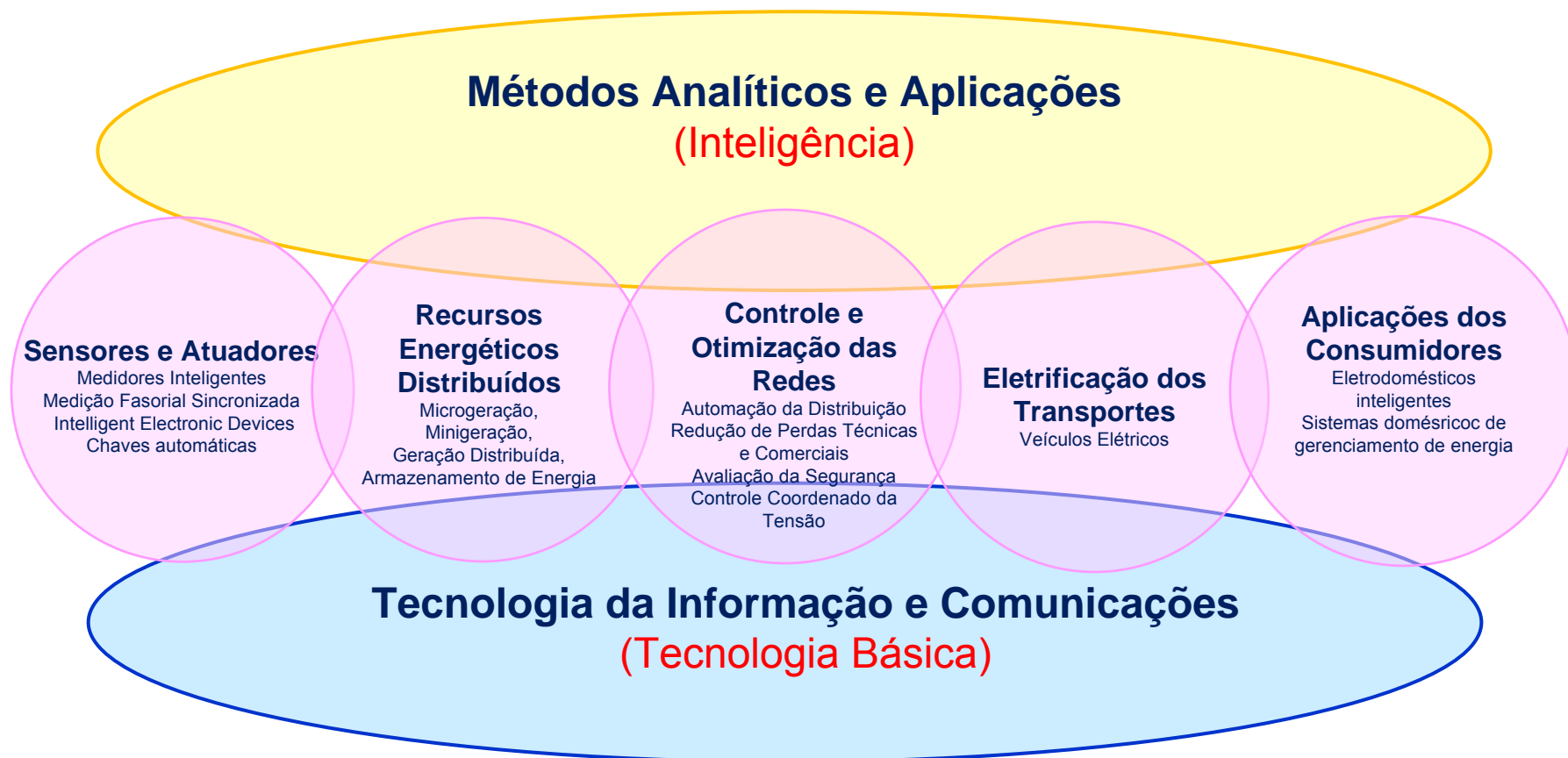
Smart Grid (SG)

■ Um conceito

É uma rede eléctrica com **elevada integração de tecnologia de informação, telecomunicações, sensoriamento/medição e automação**, de forma a aumentar consideravelmente sua capacidade de atender cenários com fontes intermitentes e distribuídas de energia, altos requisitos de confiabilidade, baixo impacto no meio ambiente e compatível com novos mercados de energia.

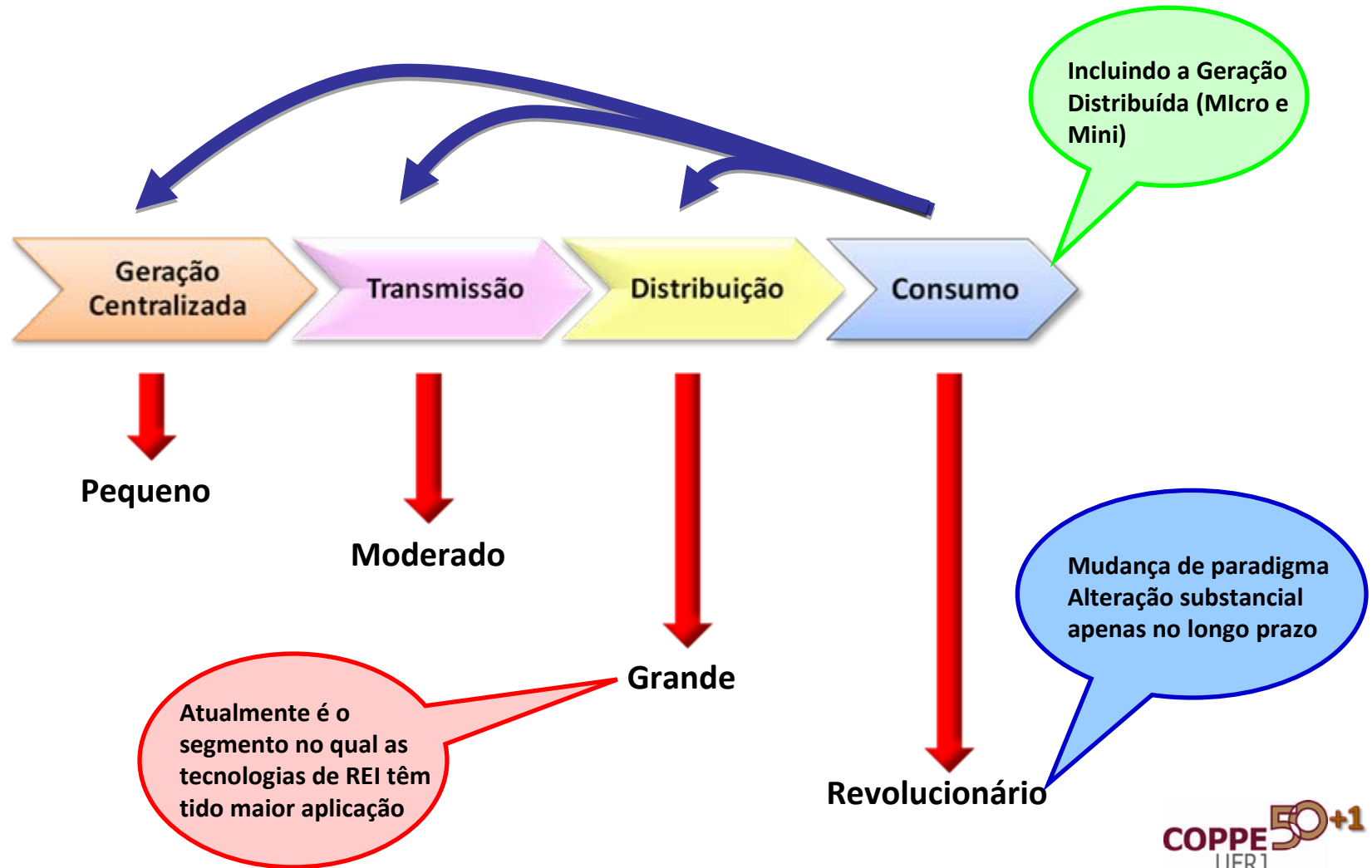


Componentes das REI

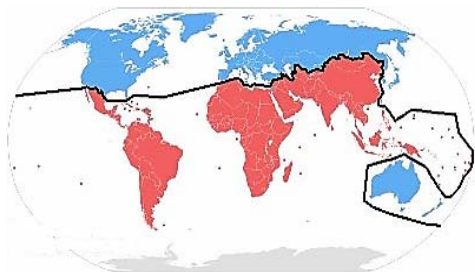


Fonte: Edwin Liu
Quanta Technology

Impactos das REI



Porque precisamos de REI?

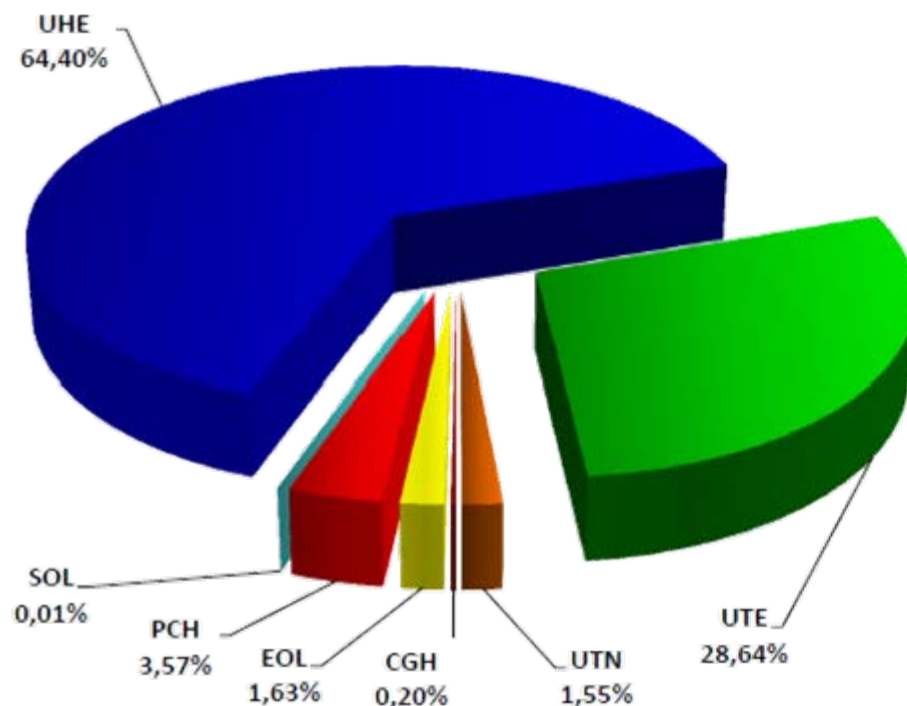


- Redução de CO₂
- Redução do consumo (energia)
- Redução de custos operacionais
- Confiabilidade e segurança



- Melhoria da qualidade do serviço
- Redução de perdas (técnicas e comerciais)
- Redução da ponta (potência)

Geração de Energia Elétrica no Brasil



Fonte: Banco de Informação da Geração (BIG/ANEEL) AGO/2013

Sistemas Isolados
3% do Mercado
Predominância: Termelétricas

Empreendimentos em Operação

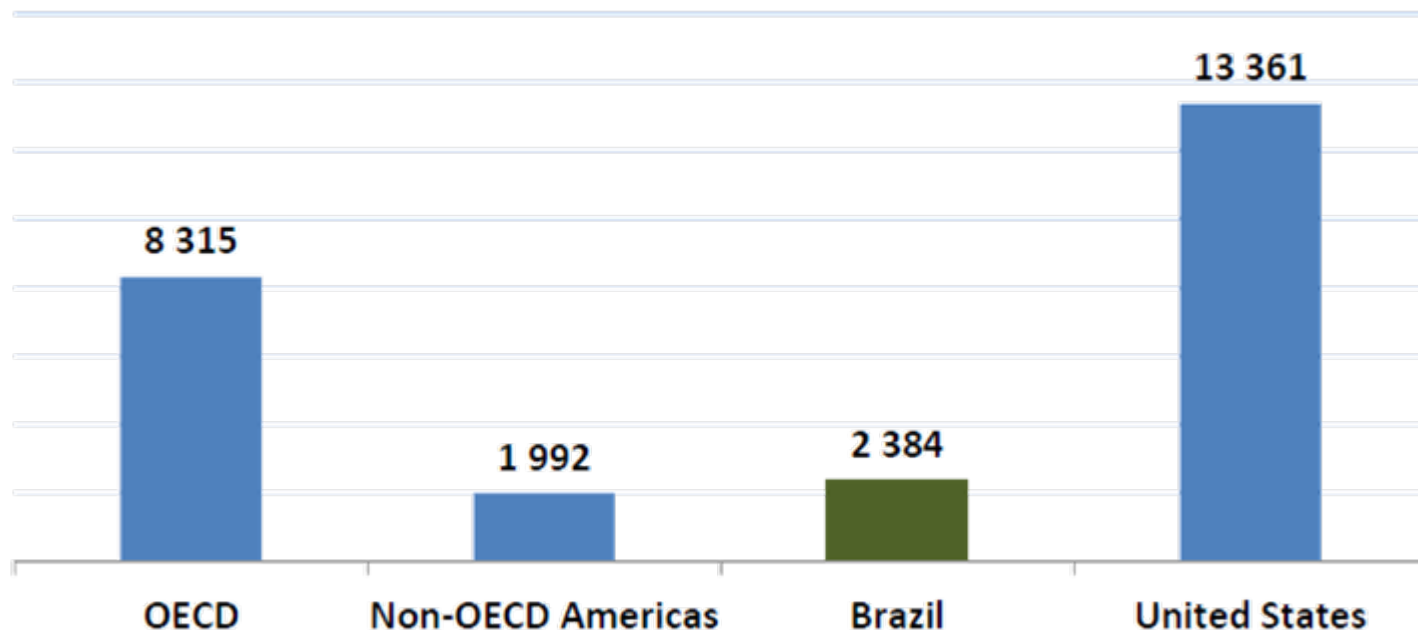
| Tipo | Quantidade | Potência (MW) | % |
|--------------|--------------|----------------|------------|
| CGH | 418 | 252 | 0,20 |
| PCH | 459 | 4.718 | 3,67 |
| EOL | 96 | 2.107 | 1,63 |
| SOL | 19 | 6 | 0,01 |
| UHE | 192 | 82.771 | 64,33 |
| UTE | 1.733 | 36.812 | 28,61 |
| UTN | 2 | 1.990 | 1,55 |
| Total | 2.919 | 128.656 | 100 |

O Brasil possui em operação 2.919 empreendimentos, gerando 128.656 MW de potência.

Sistema Interligado
97% do Mercado
Predominância: Hidrelétricas

Potencial de Crescimento da Demanda

Consumo de eletricidade por população 2010
(kWh/capita)



Fonte: Key World Energy Statistics, 2012 – International Energy Agency

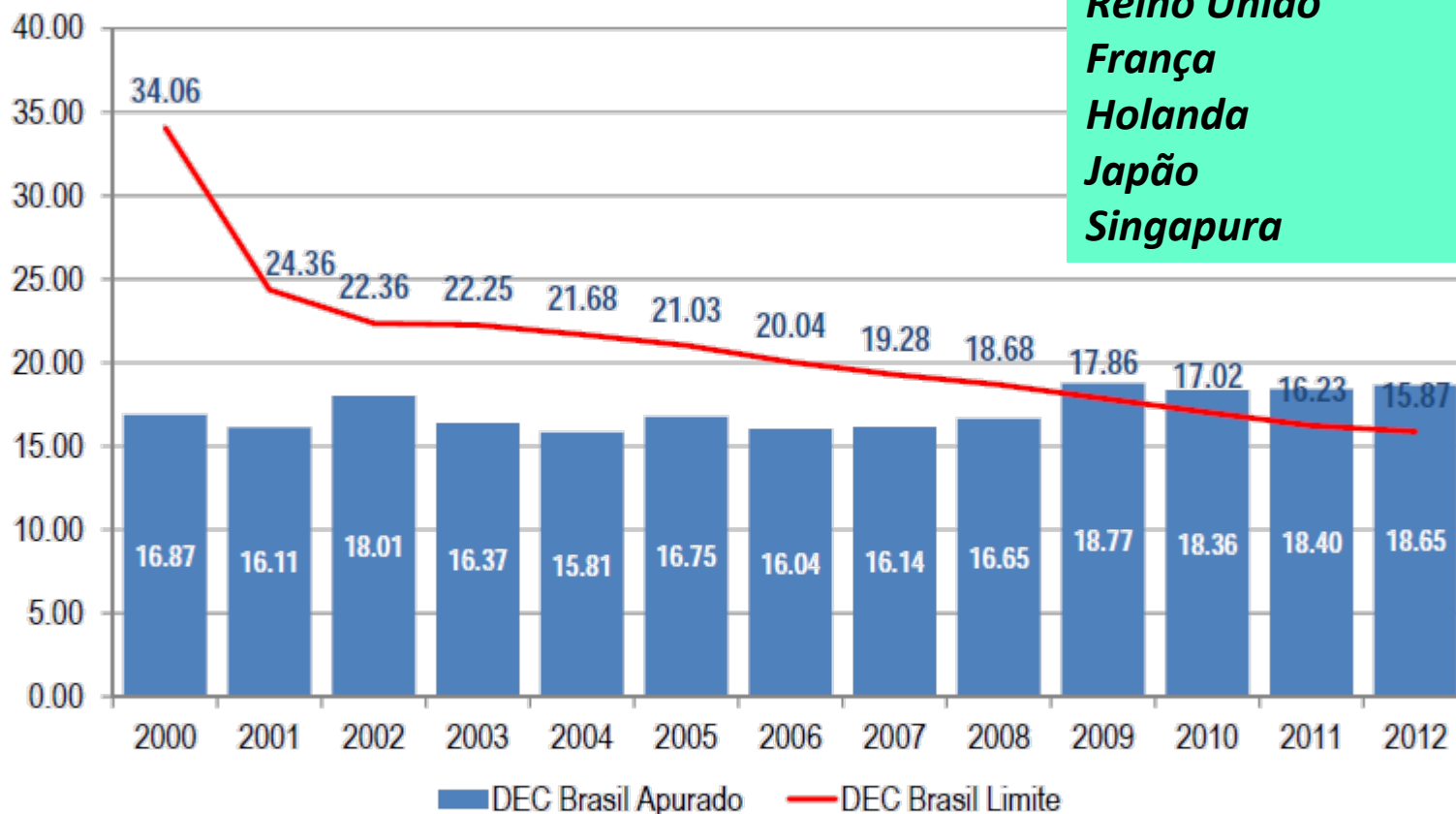
OECD - Organization for Economic Co-operation and Development

<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,31287,en.html>

Qualidade do Suprimento

DEC no Mundo (minutos)

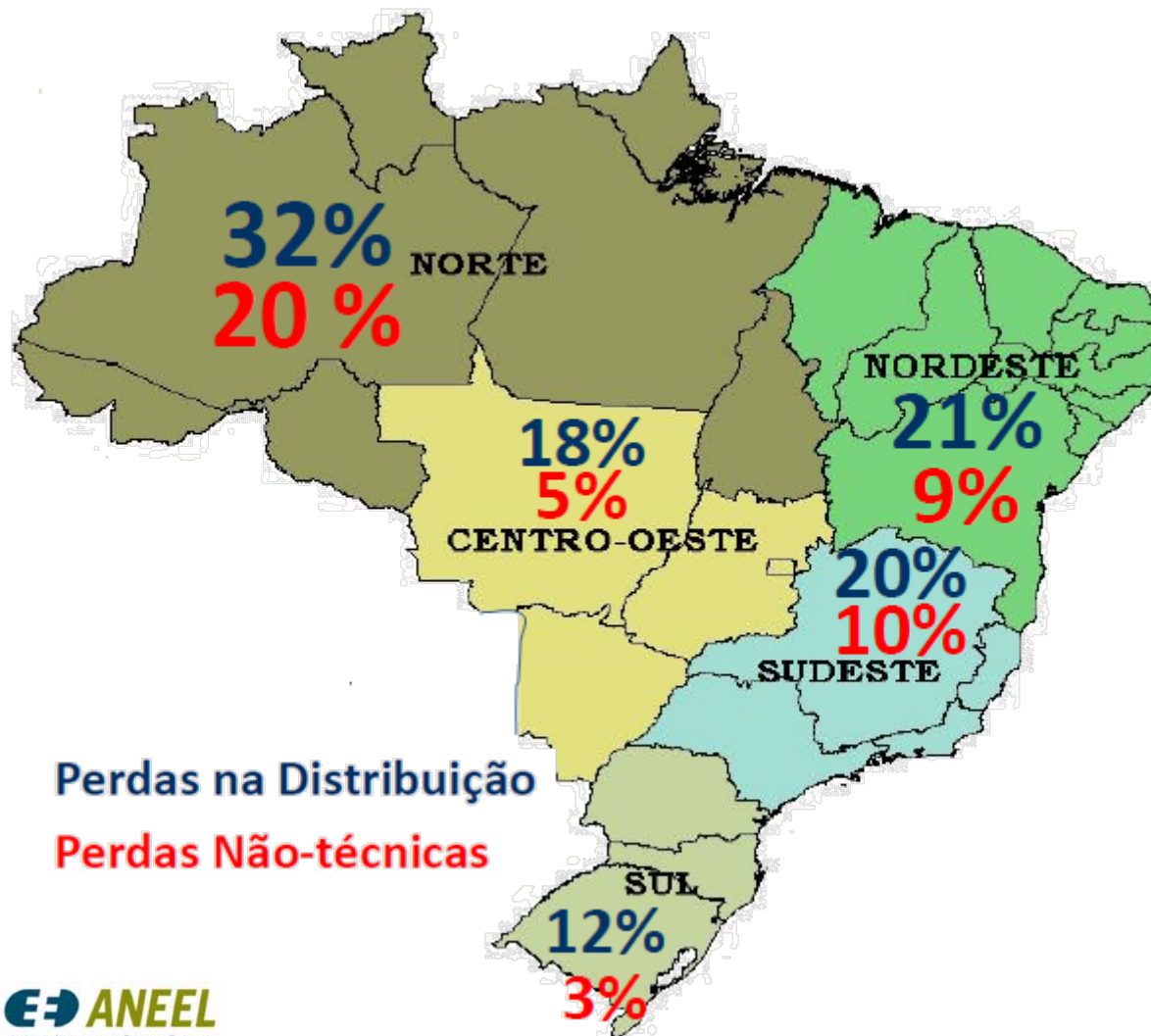
| | |
|-----------------------|------------|
| <i>Estados Unidos</i> | 214 |
| <i>Reino Unido</i> | 70 |
| <i>França</i> | 53 |
| <i>Holanda</i> | 29 |
| <i>Japão</i> | 6 |
| <i>Singapura</i> | 2 |



Duração média de interrupções Brasil (horas)

http://www.aneel.gov.br/area.cfm?id_area=80

Perdas na Distribuição



Perdas na
Distribuição no
Mundo (%)

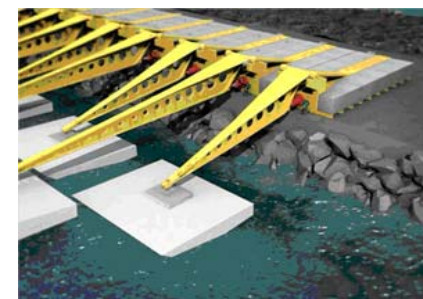
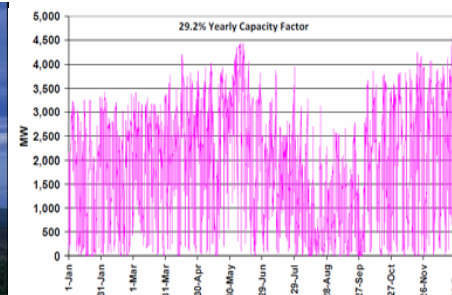
| | |
|-----------------------|------|
| | 18,8 |
| <i>Brasil</i> | 12,2 |
| <i>Rússia</i> | 8,1 |
| <i>Reino Unido</i> | 7,8 |
| <i>China</i> | 6,8 |
| <i>Estados Unidos</i> | 5,1 |
| <i>Japão</i> | 4,4 |
| <i>Coréia do Sul</i> | |

Fonte: US Energy Information
Administration (EIA)

Onde as REI podem ajudar

■ Fontes intermitentes de energia e armazenamento

- Eólica
- Solar
- Ondas
- Armazenamento
- Veículos Elétricos(VE)



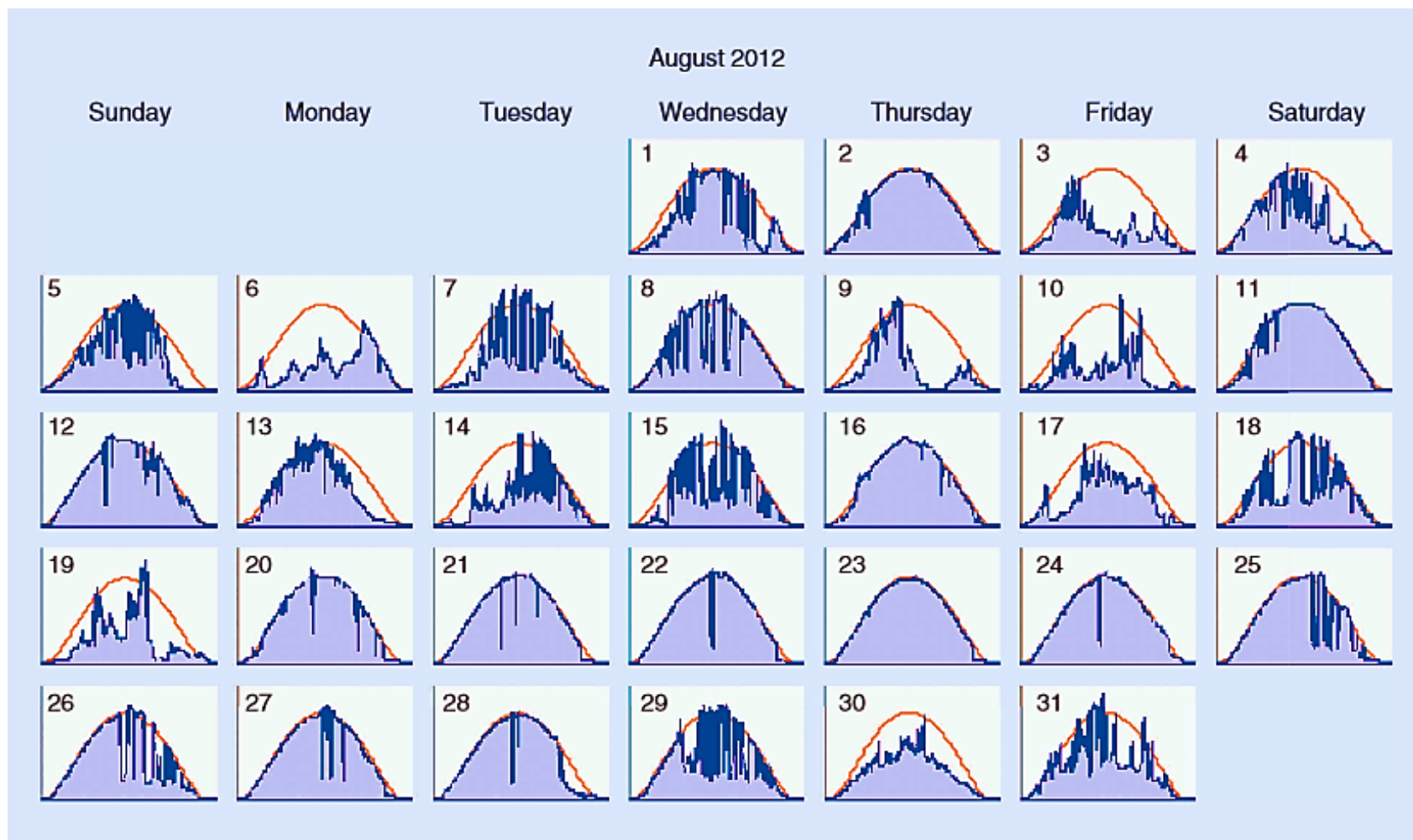
■ Geração distribuída conectada na rede de distribuição

- Microgeração (Roof Top)
- Minigeração



COPPE 50+1
UFRJ

Variabilidade da Geração Fotovoltaica

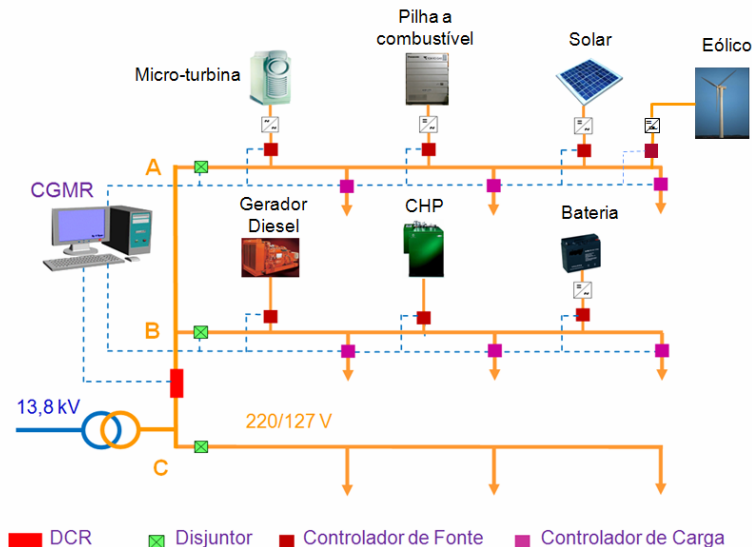


Fonte: C.Trueblood et alli., "PV Measures Up for Fleet Duty", IEEE Power and Energy, vol11, no. 2,pp. 33-44, Mar/Apr 2013.

Onde as REI podem ajudar (cont.)

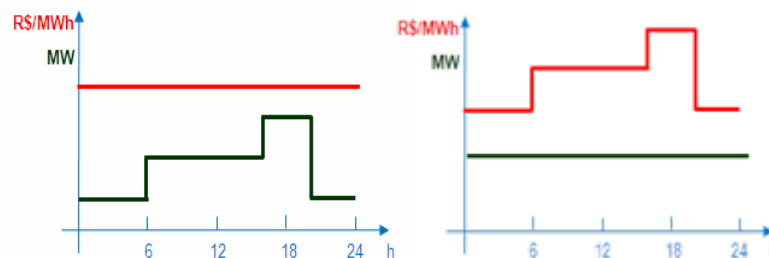
■ Melhoria da confiabilidade

- Automação da distribuição
- Microrredes
- WAMPAC (Wide Area Monitoring, Protection and Control)



■ Gerenciamento pelo lado da demanda

- Resposta da demanda (redução da ponta)
- Tarifação dinâmica



Onde as REI podem ajudar (cont.)

■ Redução de Perdas

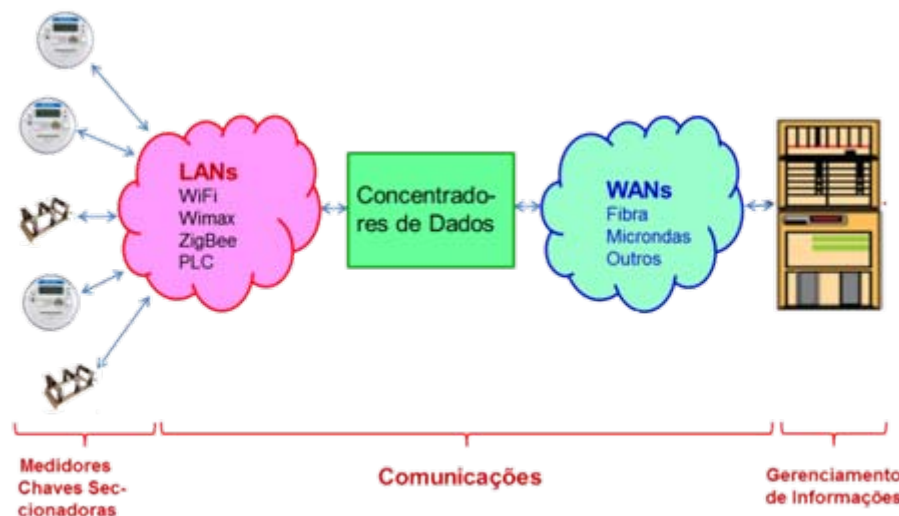
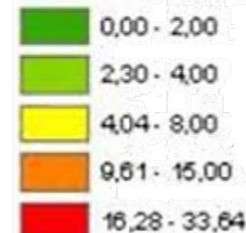
- Perdas Técnicas
- Perdas Não-Técnicas (Furto e Fraude)
- Meios
 - Medição eletrônica e blindagem da rede
 - AMI: Advanced Metering Infrastructure
 - MDI: Meter Data Management
 - Controle coordenado da tensão

■ Outros Custos

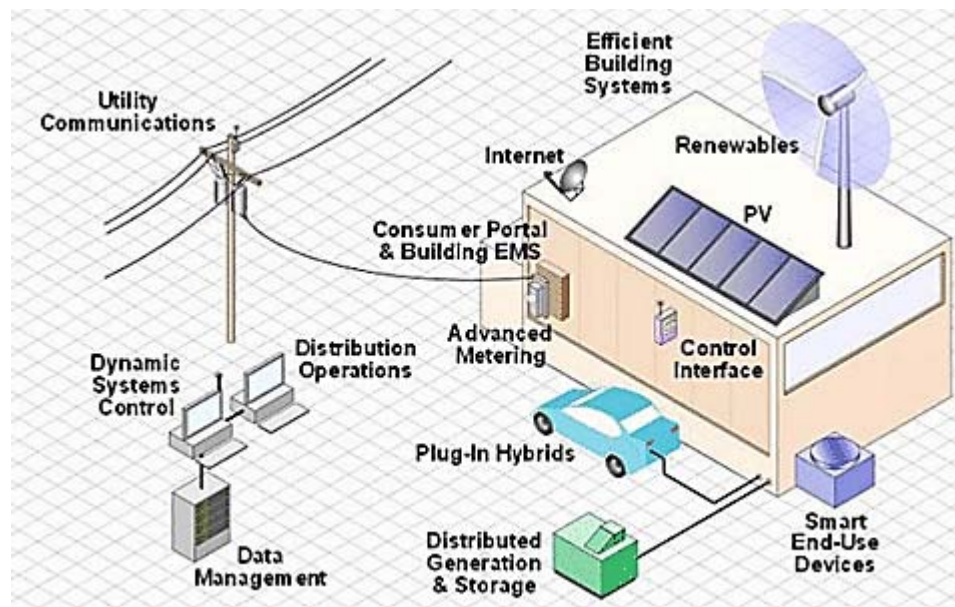
- Grandes áreas de concessão
- Alimentadores radiais longos
- Áreas de difícil acesso
- Aplicações:
 - Faturamento
 - Localização de faltas
 - Self Healing
 - Monitoração de ativos

Legenda

Distribuidora Perda Não Técnica



Tecnologias de REI



Medidor Inteligente

Smart Meter

■ Características Possíveis

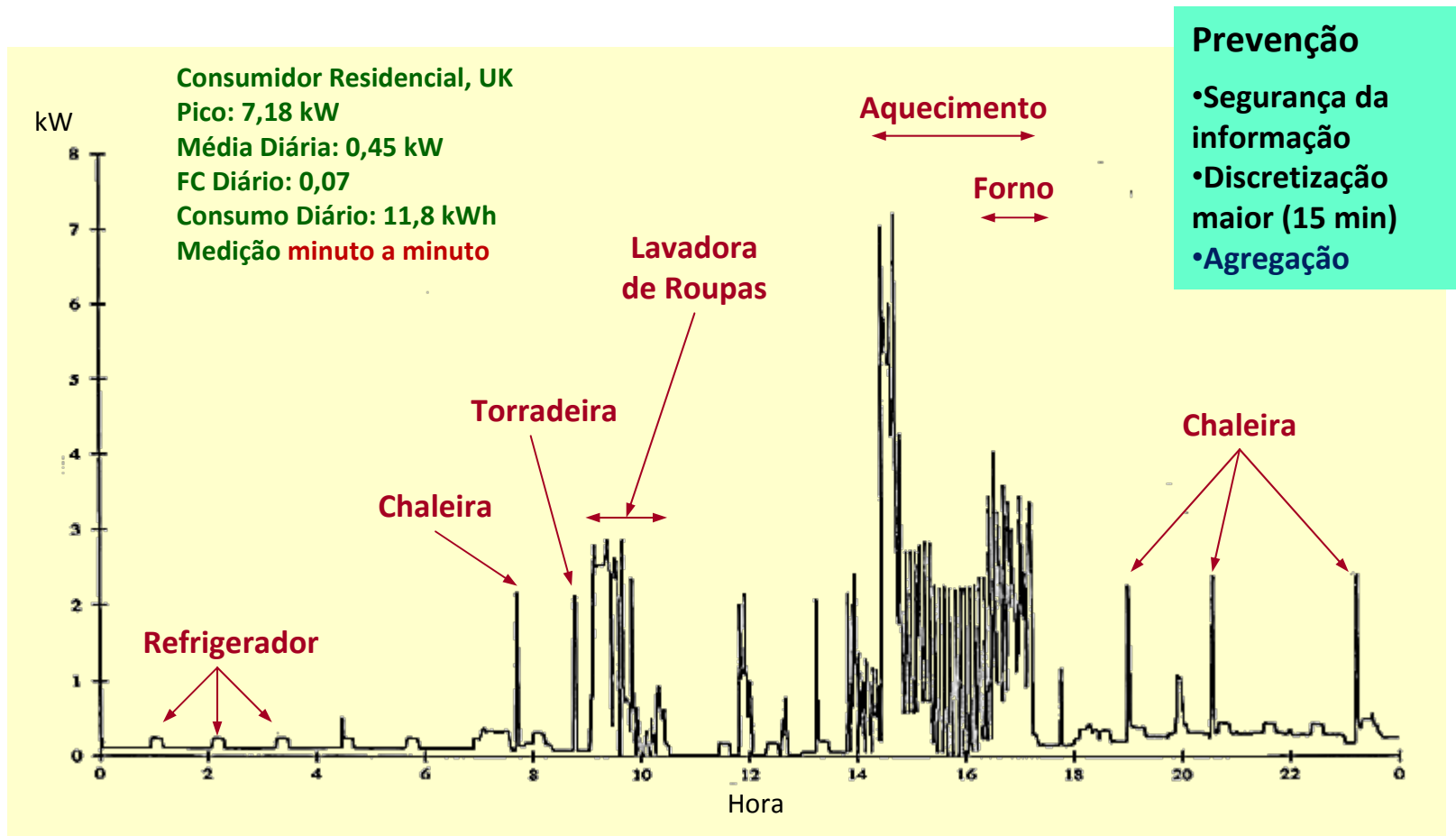
- Maior acurácia
- Comunicação bidirecional
- Aquisição de várias informações além do kWh
- Medição em quatro quadrantes (EP, EQ)
- Menos suscetível a fraude
- Postos tarifários
- Ações remotas de corte e desligamento
- Calcular índices de qualidade (DIC, FIC, etc.)
- Display remoto para comunicação com consumidores
- Etc.

■ Display Doméstico

- Dispositivo móvel para permitir acesso fácil aos dados de medidor inteligente



Privacidade



G. Wood and M. Newborough, "Dynamic Energy-Consumption Indicators for Domestic Appliances: Environment, Behaviour and Design, *Energy & Buildings*, vol. 35, no. 8, pp. 821-841, 2003.

Sistemas de Medição de Energia

■ Convencional

- Coleta mensal
- Medidor eletromecânico ou eletrônico
- Leitura manual e processamento manual ou automático
- Banco de dados

■ AMR (Automated Meter Reading)

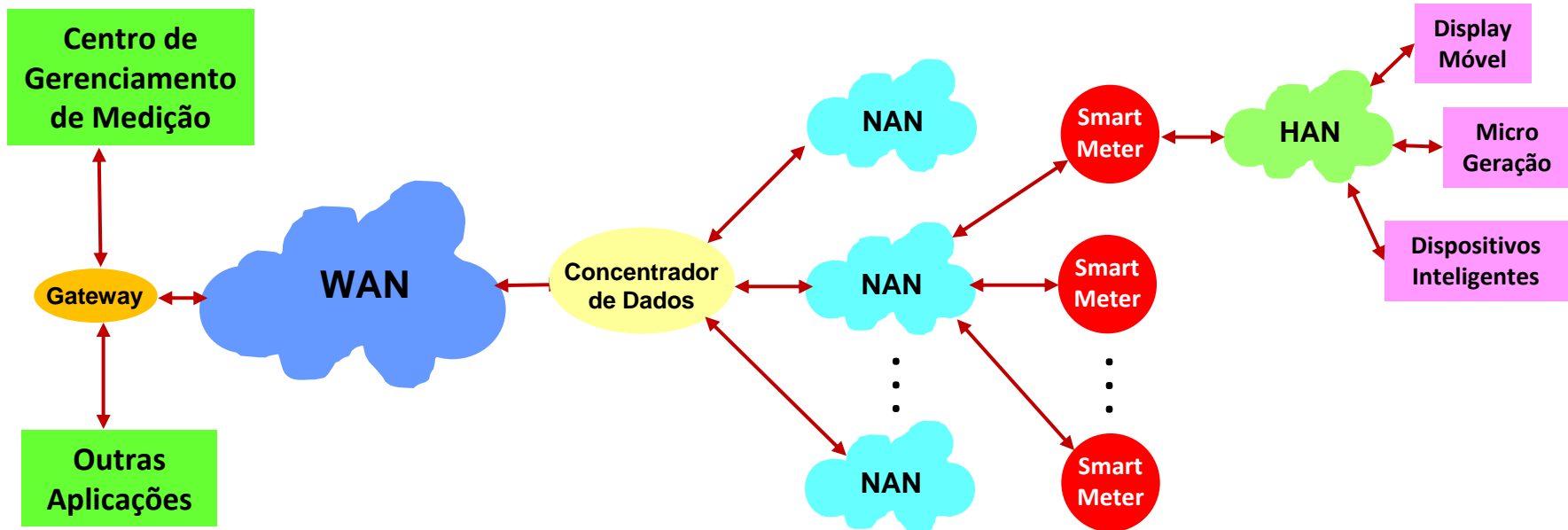
- Coleta em quase tempo-reall
- Comunicação mono-direcional
- Medidor eletrônico, leitura automática
- Processamento automático
- Banco de dados

■ AMI (Advanced Meter Infrastructure)

- Coleta em quase tempo-real
- Comunicação bi-direcional
- Medidor eletrônico, leitura automática
- Processamento automático
- Banco de dados
- Análise de dados (Data Analytics)



Advanced Metering Infrastructure



HAN: Home Area Network

NAN: Neighbourhood Area Network (Última Milha)

WAN: Wide Area Network

Telecomunicações para REI

■ Tecnologias

| Tecnologia | Aplicações em AMI |
|---------------------------------|-------------------|
| Power Line Communications (PLC) | HAN, NAN |
| Wireless | |
| Celular (3G,4G) | WAN,NAN |
| WiFi | HAN |
| Wimax | NAN |
| ZigBee | HAN, NAN |
| RF Mesh | NAN |
| Fibra Ótica | WAN |
| Satélite | WAN |

■ Interoperabilidade

- Capacidade de um sistema de se comunicar de forma transparente com outros sistemas semelhante ou não
- Aspecto crucial; exige o estabelecimento de padrões

■ Segurança

- Proteção contra acesso, alteração ou destruição não intencional ou não autorizada de dados
- Proteção contra eventos inesperados e desastres naturais

Data Analytics and Big Data

■ Tsunami de Dados

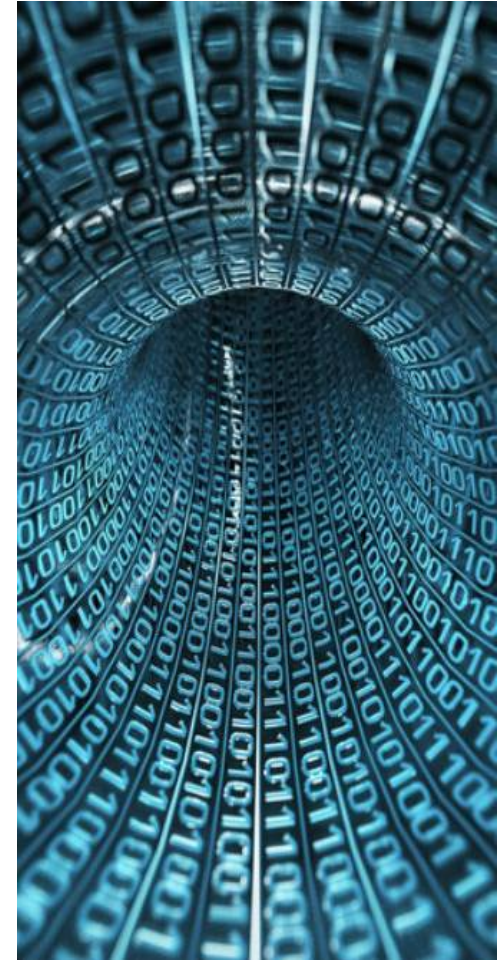
- Extremamente elevado volume de dados coletados por medidores inteligentes e outros sensores introduzidos na rede

■ Big Data

- Técnicas especiais para o armazenamento, manipulação, transferência, etc., de grandes volumes de dados

■ Análise de Dados

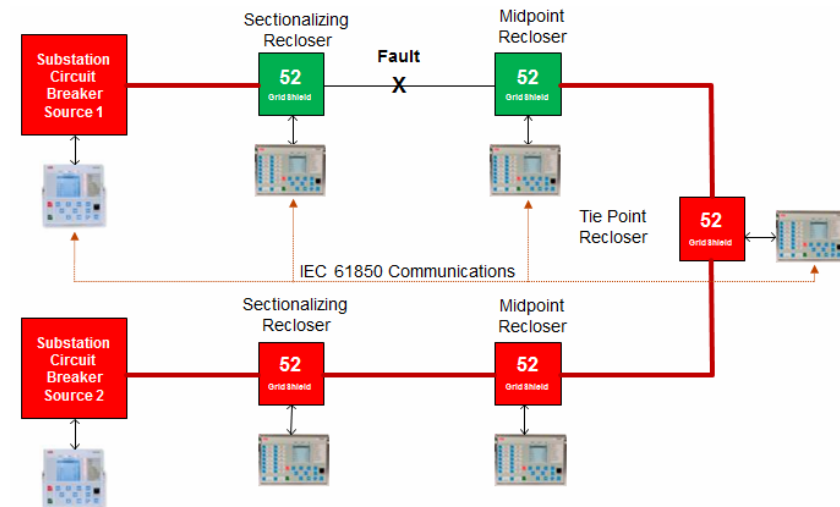
- Processo de inspeção, limpeza, transformação e modelagem de dados, com o objetivo de descobrir informações úteis, sugerindo conclusões, e apoiar a tomada de decisão
- Aplicações em
 - Previsão de carga
 - **Detecção de fraudes**
 - Sistemas de pré-pagamento
 - Tarifação dinâmica
 - Gerenciamento da demanda
 - Etc.



Self Healing

Fault Location, Isolation, and Service Restoration (FLISR)

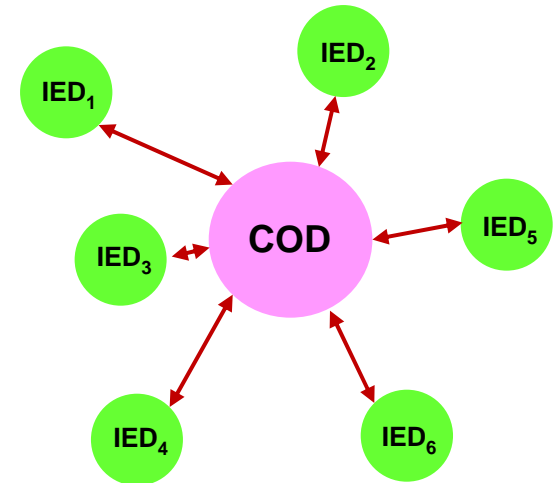
- Capacidade de detectar, analisar, responder e restaurar falhas na rede elétrica de forma automática
- Utiliza informações em tempo real geradas por sensores
- Dispositivos de sensoriamento e acionamento
 - Detectores de curto-circuito
 - Chaves automáticas
 - Religadores inteligentes
 - IEDs
- Rede de comunicações
 - Específica ou a mesma utilizada para AMI?



Métodos Inteligentes para Recomposição

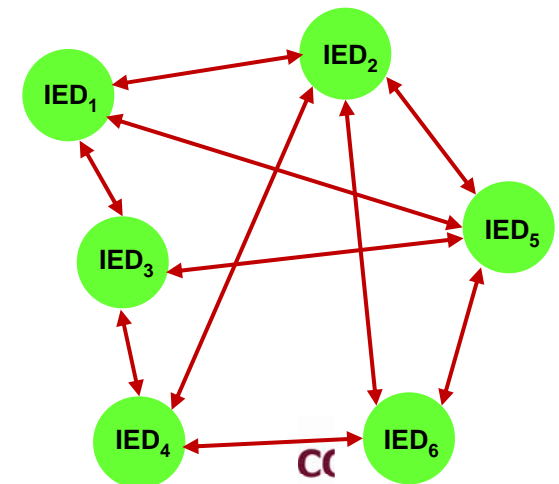
■ Inteligência Centralizada

- Baseado no sistema SCADA/COD
- Informação obtida ao longo da rede enviada para COD
- Executa algoritmo de reconfiguração de rede
- Envia comando de abertura/fechamento de chaves



■ Inteligência Distribuída

- Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs) distribuídos ao longo da rede elétrica trocam informações entre si
- Métodos de inteligência distribuída decidem ações de cada dispositivo de seccionamento (**Sistemas Multiagentes**)
- Chaves e disjuntores são então acionados



Controle e Otimização do Perfil de Tensões

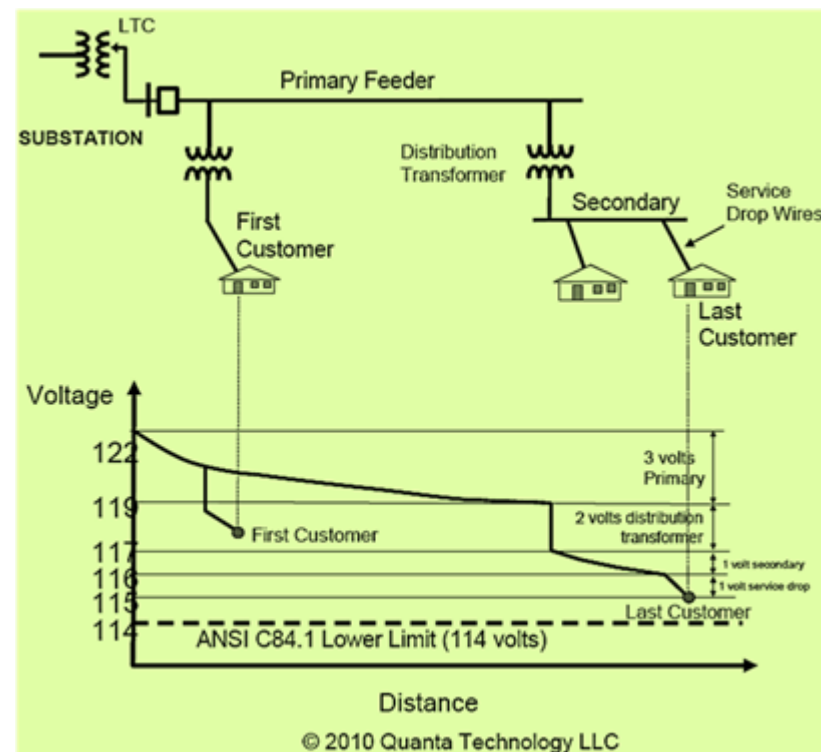
Volt-VAR Optimization (VVO) and/or Volt-VAR Control (VVC)

■ Objetivos

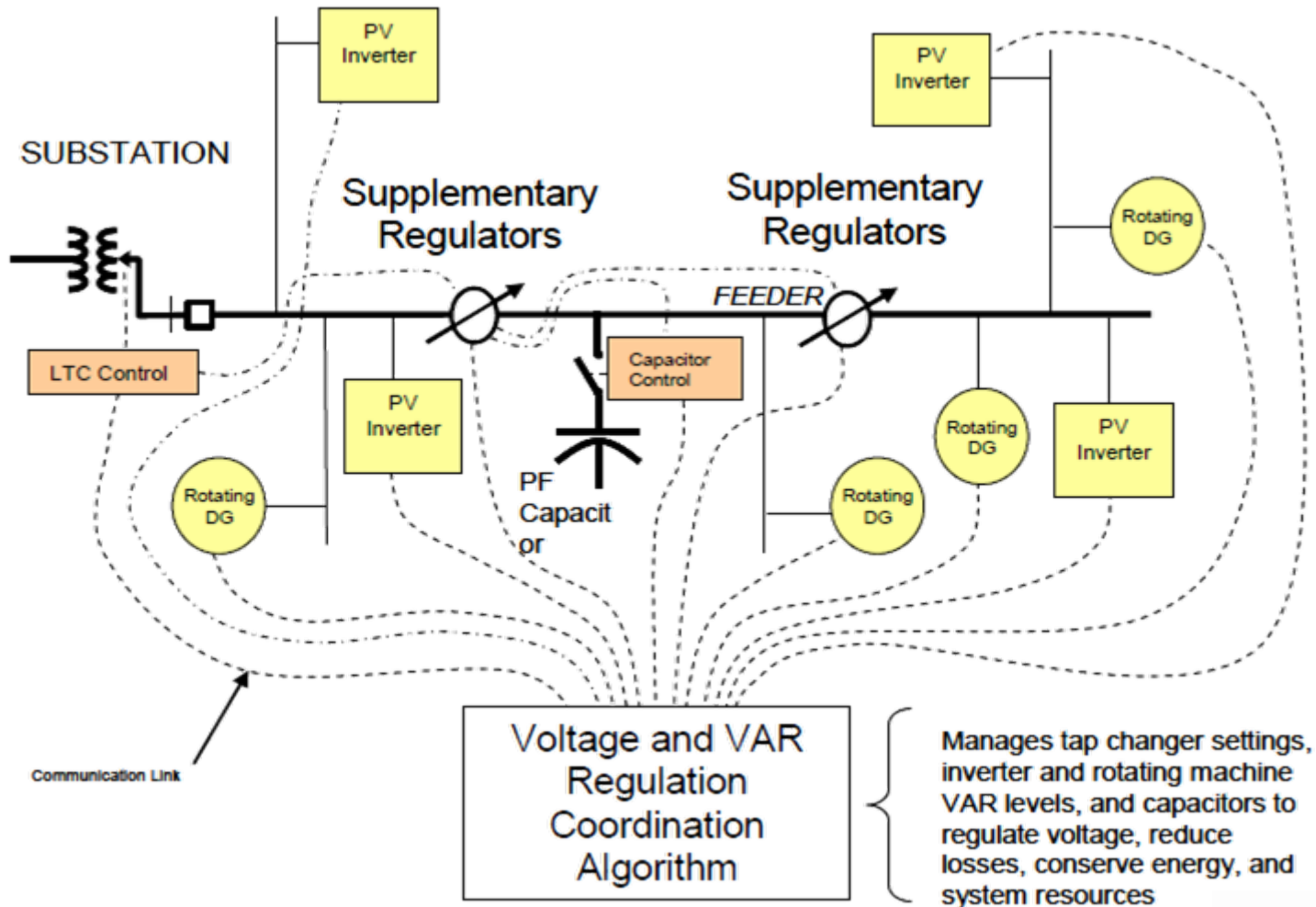
- Manter o perfil de tensões
- Redução de perdas técnicas
- Redução do consumo de energia
- Ajudar *self healing*
- Permitir o uso generalizado de micro e minigeração

■ Requisitos para Otimização

- Ações coordenadas
- Ampla utilização de recursos de TIC
- Técnicas de otimização
- Equipamentos inteligentes
 - Regulador de tensão bidirecional
 - Dispositivos FACTS ?



Controle Coordenado de Tensão



Microrredes

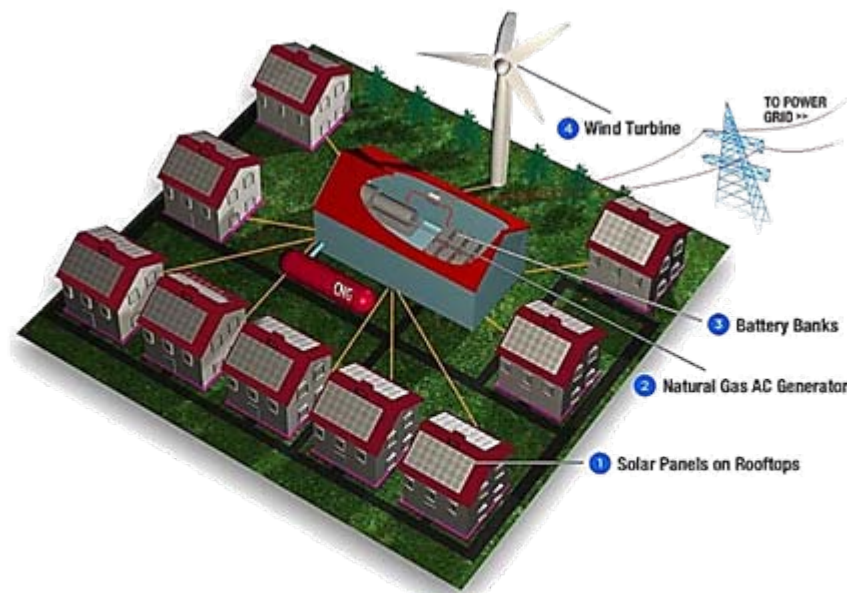
■ Conceito

- É um sistema de energia limitado regionalmente, contituído por recursos energéticos distribuídos, consumidores e, opcionalmente, armazenamento
- Opera de forma autônoma, conectada ou não à concessionária
- Atua como um agente único perante a concessionária, agregando os recursos distribuídos

■ Características Buscadas

- Autonomia
- Estabilidade
- Compatibilidade
- Flexibilidade
- Escalabilidade

■ Diferentes formatos e dimensões



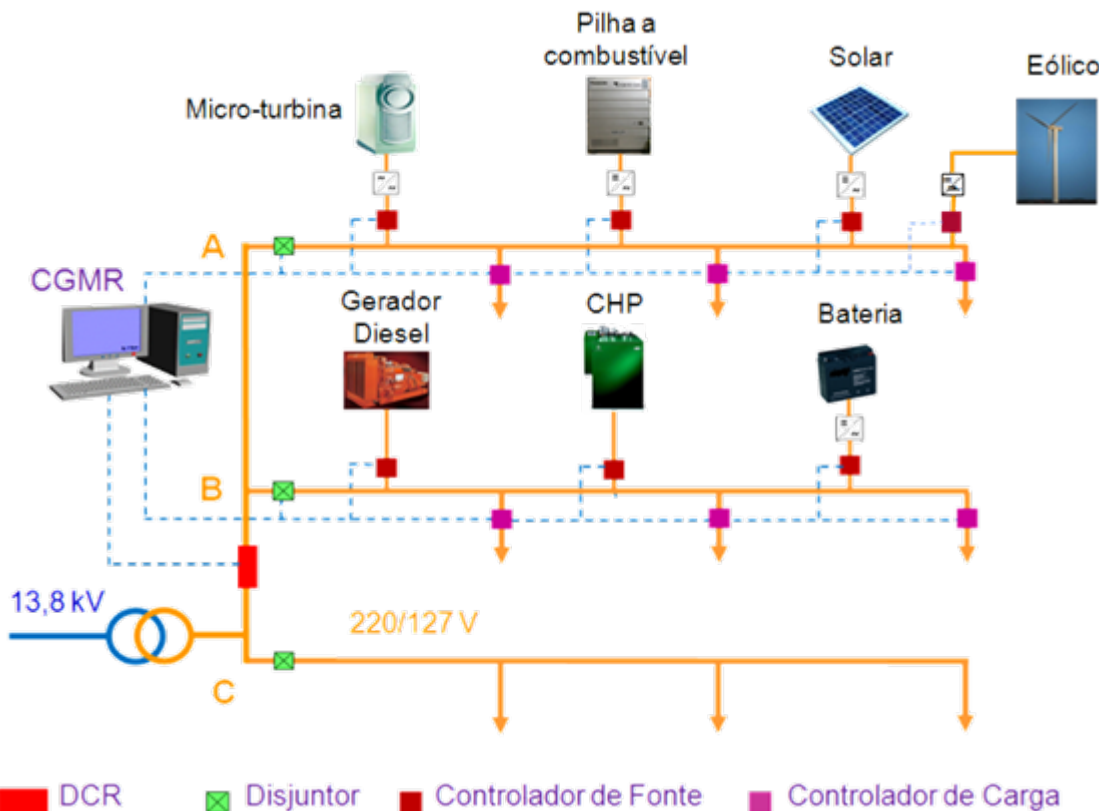
MICROGRID

A Scalable, Distributed Clean Power Solution
www.cleanskies.org/infographics/microgrid

COPPE 50+1
UFRJ

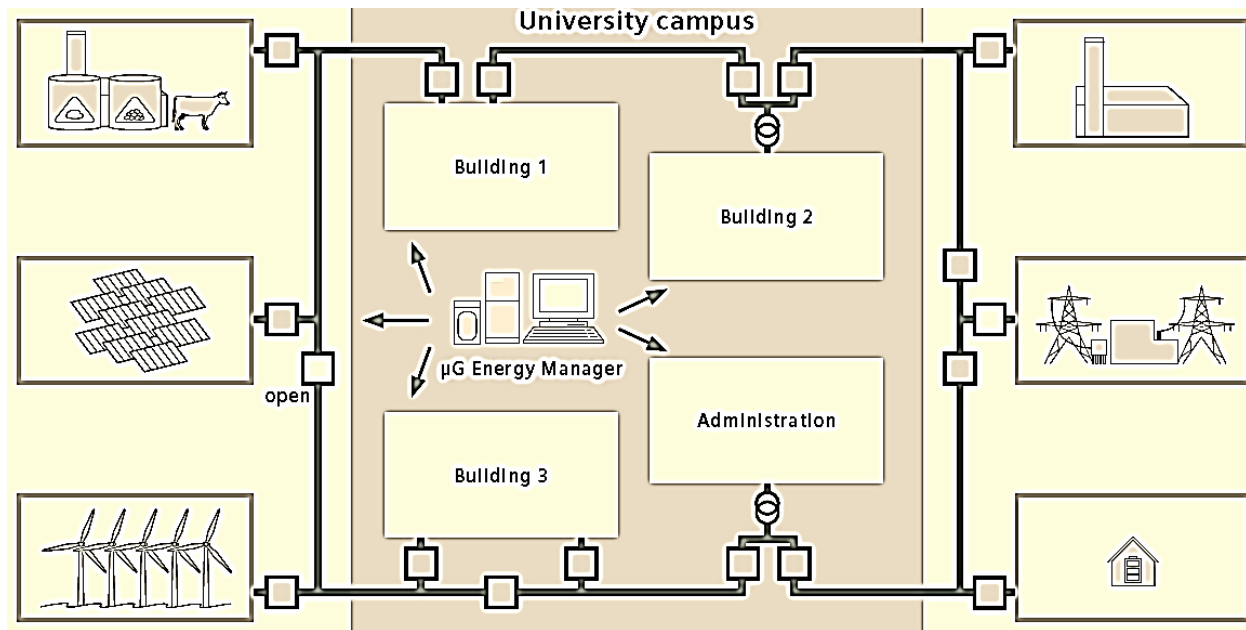
Pequeno Porte

- Grupo de residências, condomínios, edifícios, etc.
- Conexão em baixa tensão (220/127 V)
- Conectada à concessionária em MT
- Consumidor/produtor autônomo



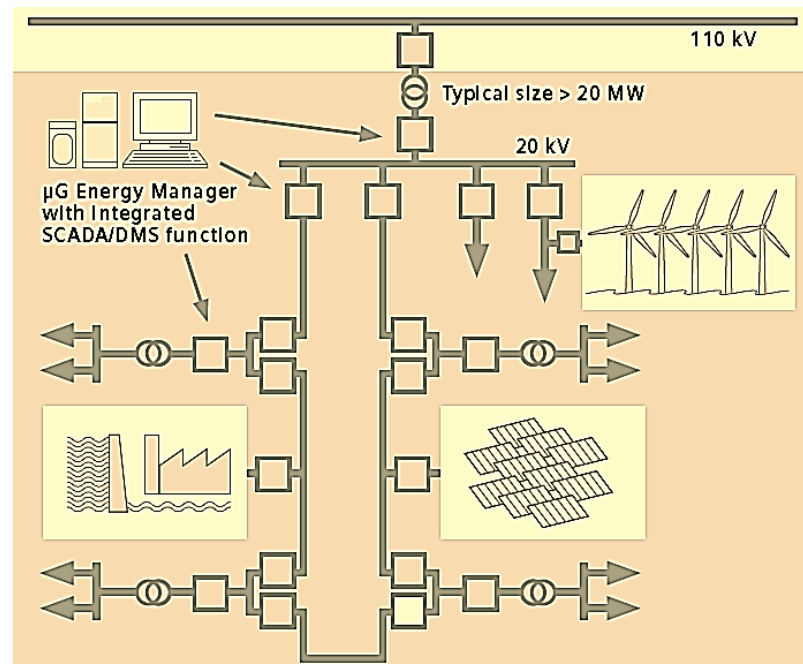
Microrrede em um Campus Universitário

- Agregam fontes de vários tipos para alimentar um conjunto de edifícios
- Capacidade na ordem de dezenas de MW
- Confiabilidade moderada a alta
- Em geral utilizada também como equipamento de pesquisa



Microrredes Cooperativas ou da Concessionária

- Encapsulam uma parte da rede de distribuição servindo a uma comunidade
- Podem ser privadas ou de propriedade da concessionária
- Agregam fontes de maior capacidade (PCHs, fazendas eólicas, etc.)
- Interagem diretamente com sistema de supervisão da concessionária

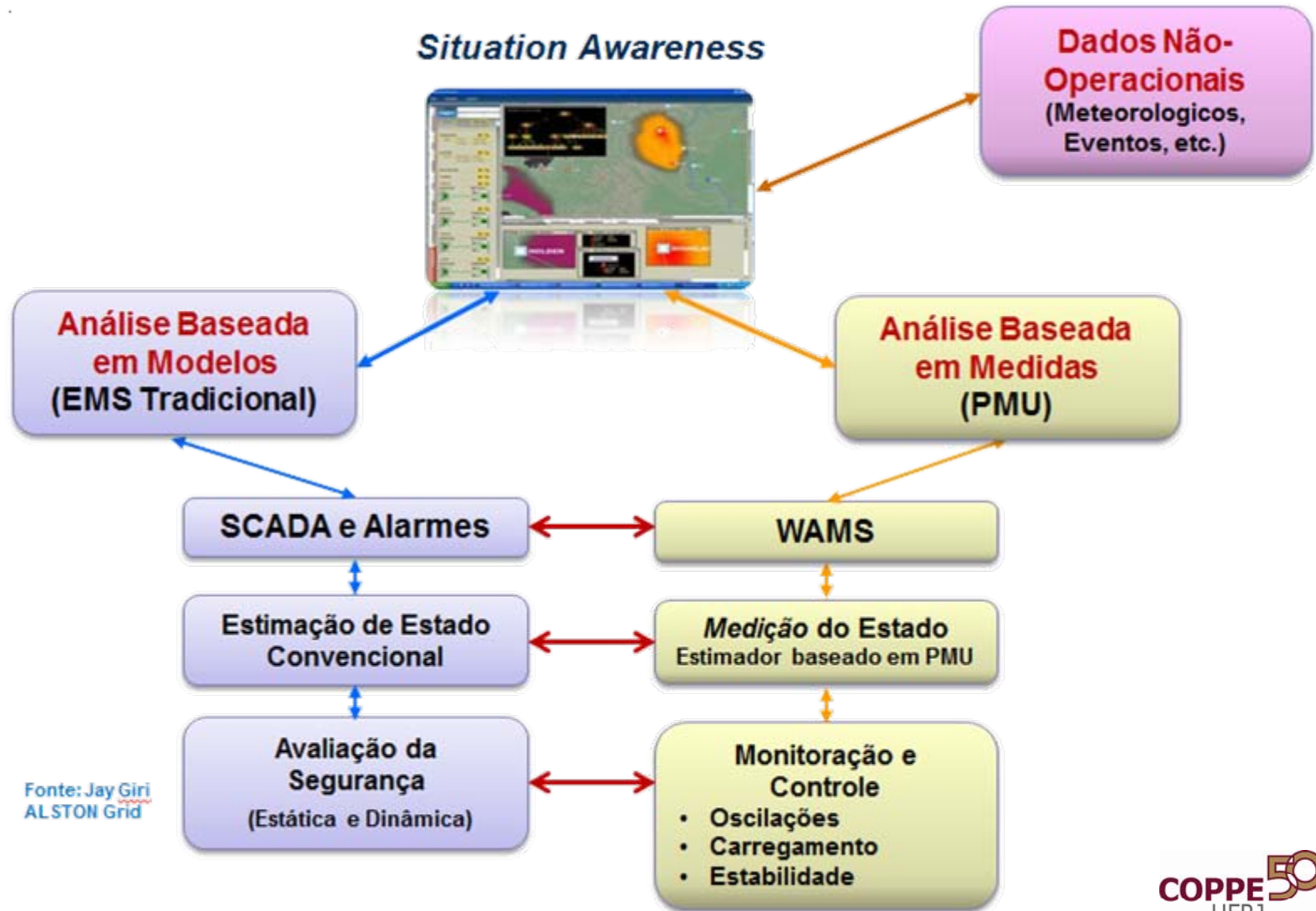


WAMPAC

Wide Area Monitoring Protection and Control

- **Sistemas de Monitoração, Proteção e Controle de Área Ampla**
 - Monitorar a dinâmica do sistema elétrico de potência em tempo-real
 - Identificar fragilidades relacionadas à estabilidade
 - Permitir ações corretivas
 - Baseada no uso de **Medição Fasorial Sincronizada (PMU)**
- **Aplicações**
 - Estimação de estado (estático e dinâmico)
 - Monitoração do carregamento
 - Detecção de proximidade de instabilidade
 - Monitoramento de oscilações

Cenário de Transição



REI no Mundo e no Brasil



REI no Mundo

■ Primeiros Desenvolvimentos

- Projetos de automação da distribuição na década de 1980
- Wide Area Measurement System (WAMS) 2000 (BPA)



REI no Mundo (cont.)

■ Itália

- Telegestore (2005): 32 milhões de medidores inteligentes

■ Estados Unidos

- American Recovery Reinvestment Act (ARRA)
- Austin, Texas (2003): 1/3 do medidores substituídos
- Boulder, Colorado
- Southern California Edison: 5 milhões de medidores inteligentes (2009-20012); 10 milhões até 2020
- Xcel Energy:

■ Portugal

- Évora: Projeto InovGrid

■ Grupos de Usuários e Instituições

- IEEE Smart Grid Initiative (USA)
- NIST (USA)
- Galvin Electricity Initiative (USA)
- Intelligrid - EPRI (USA)
- SG European Technology Platform

Iniciativas Relacionadas a REI no Brasil

- **Grupo de Trabalho do MME**
- **Grupo de Estudos da CGEE/MCTI**
 - Redes Elétricas Inteligentes: Contexto Nacional
- **Aneel**
 - Powerline Communications (REN 375/2009)
 - Sistema de Informações Geográficas (PRODIST)
 - Tarifas horárias (PRORET)
 - Medidores eletrônicos (REN 502/2012)
 - Micro e mini Geração Distribuída (REN 482/2012)
- **Projetos de P&D**
- **Programa Brasileiro de Redes Inteligentes**
 - Projeto Estratégico de P&D Aneel
 - CEMIG + 36 concessionárias de distribuição e geração
 - Coordenado pelo Instituto ABRADÉE
- **Projetos Piloto**



Programa Brasileiro de Redes Inteligentes

■ Objetivo

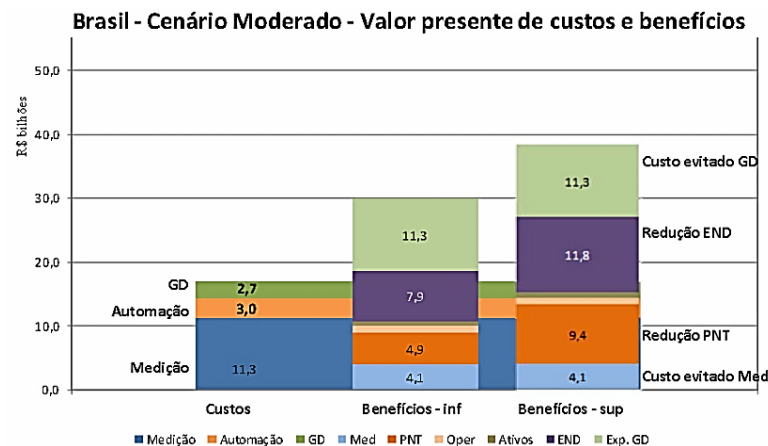
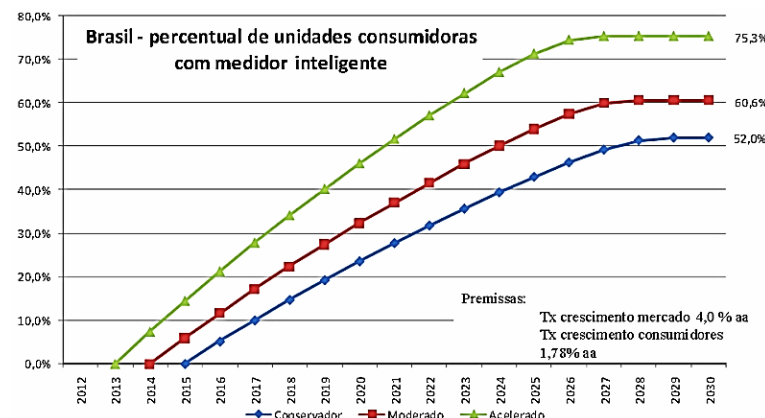
- Avaliar a relação benefício custo da adoção do conceito de redes elétricas inteligentes em três cenários
 - Conservador
 - Moderado
 - Acelerado

■ Segmentos Analisados

- Medição Inteligente
- Automação da Distribuição e da Transmissão
- Geração Distribuída; Armazenamento e Veículos Elétricos
- TI e Telecom
- Políticas Públicas e Regulação
- Perspectiva do Consumidor

■ Metodologia

- Avaliação da penetração em clusters representando configurações típicas das redes de distribuição brasileiras



Principais Projetos Piloto ou Experimentais

- ELETROBRÁS AMAZONAS ENERGIA: Parintins - AM



- CELPE: Fernando de Noronha - PE

- CEMIG: Sete Lagoas - MG

- AMPLA: Búzios - RJ

- LIGHT: Rio de Janeiro - RJ

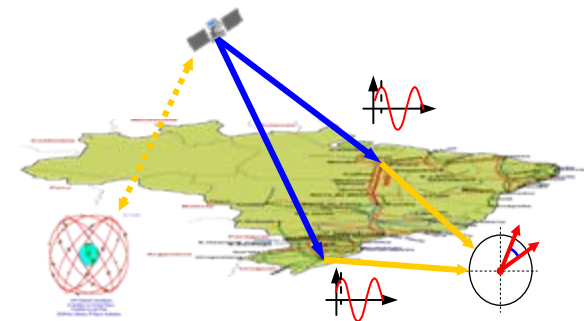
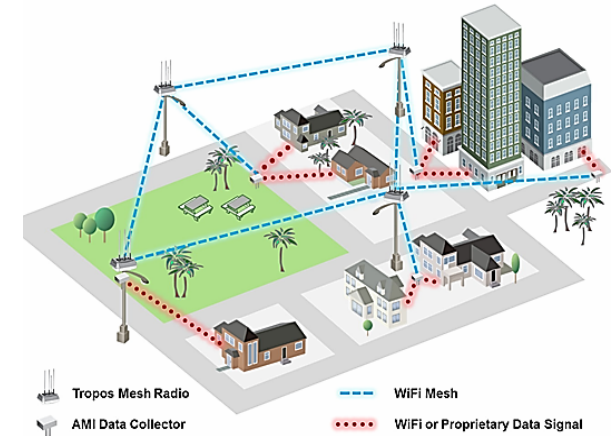
- EDP: Aparecida do Norte – SP
- ELETROPAULO – SP
- ELEKTRO - SP

Pesquisas na COPPE/UFRJ



Simulação: Energia e TIC

- Smart Grids utiliza Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) para a troca de informações através de redes de em grande área
- O desempenho das TIC tornou-se crucial para o desenvolvimento de
 - Infra-estrutura de medição avançada (AMI)
 - Automação da Distribuição
 - Monitoramento em Área pla, Proteção e Controle (WAMPAC)
- **Simulações** são uma forma comum de avaliação, mas os sistemas de energia e redes de comunicação são normalmente analisados com simuladores dedicados.
- É importante dispor-se de uma **simulação combinada** para analisar as dinâmicas e impactos mútuos de ambos os domínios

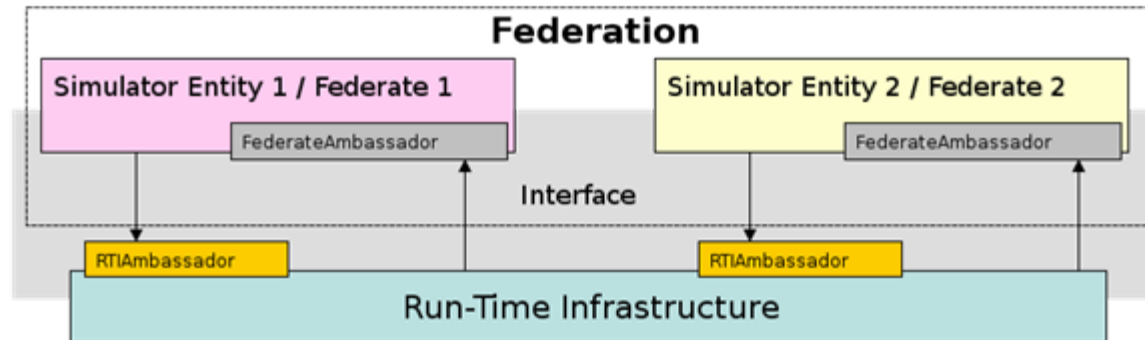


Ferramenta de Co-Simulação

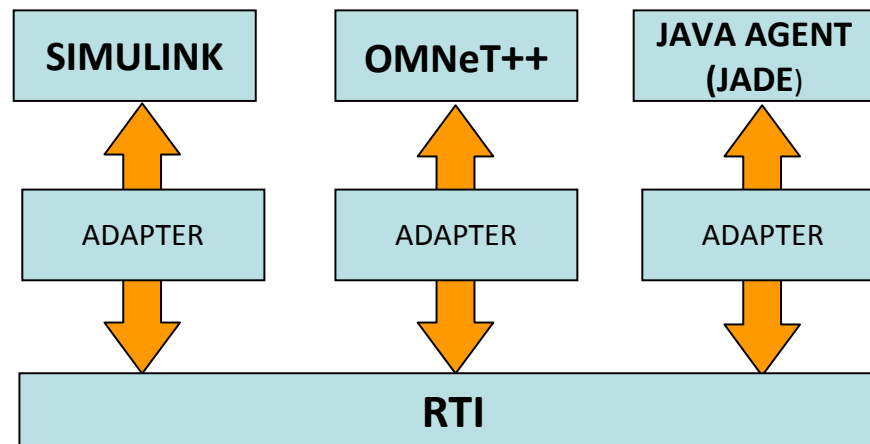
- Co-Simulação
 - Redes diferentes simuladas por seus simuladores especializados
 - O desafio principal é conectar, operar e sincronizar dados e interações entre os simuladores
 - O principal desafio é a implementação de estratégias de avanço de tempo representando os eventos
 - Arquitetura de simulação híbrida genérica baseada no padrão *IEEE High Level Architecture* para permitir uma simulação combinada dos sistemas de energia, comunicação e automação
- A interação entre os simuladores é administrada pelo *Run-Time Infrastructure (RTI)*
- HLA é um padrão de interoperabilidade para simulação distribuída usada para apoiar a análise, simulação e treinamento em um número de diferentes domínios, particularmente na área de defesa

Co-Simulação (Energia and TIC)

■ Generic *High Level Architecture* (HLA)



■ Aplicação Desenvolvida



FLISR
Implementação
Multi-Agente

Simulight

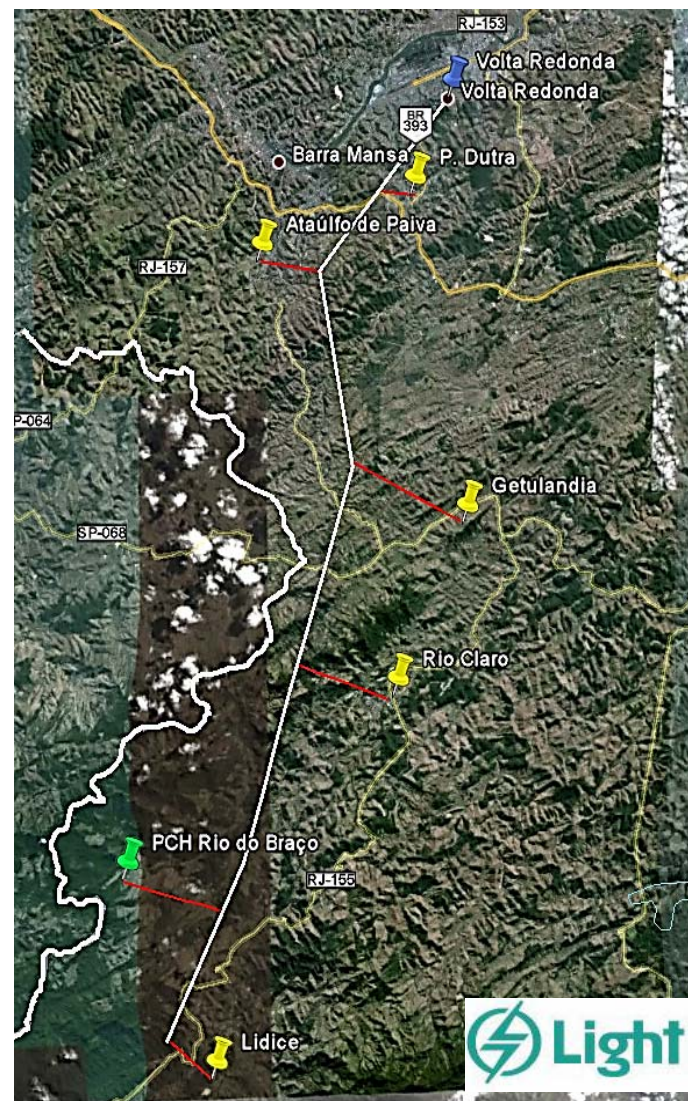
- **Tipos de Simulação**
 - Estática (fluxo de potência)
 - Quase-Dinâmica (controles lentos)
 - Dinâmica (estabilidade transitória)
- **Representação trifásica, monofásica e mista**
- **Representação de subestações no nível de chaves, disjuntores e barramentos**
- **Simulação de múltiplas ilhas e microrredes**
- **Modelagem de relés e funções de proteção**
- **Representação de Geração Eólica, Fotovoltaica, PCH e PCT**
- **Representação gráfica geo-referenciada dos alimentadores**



Versão acadêmica disponível em:
<http://www.coep.ufrj.br/~tarang/Simulight/>

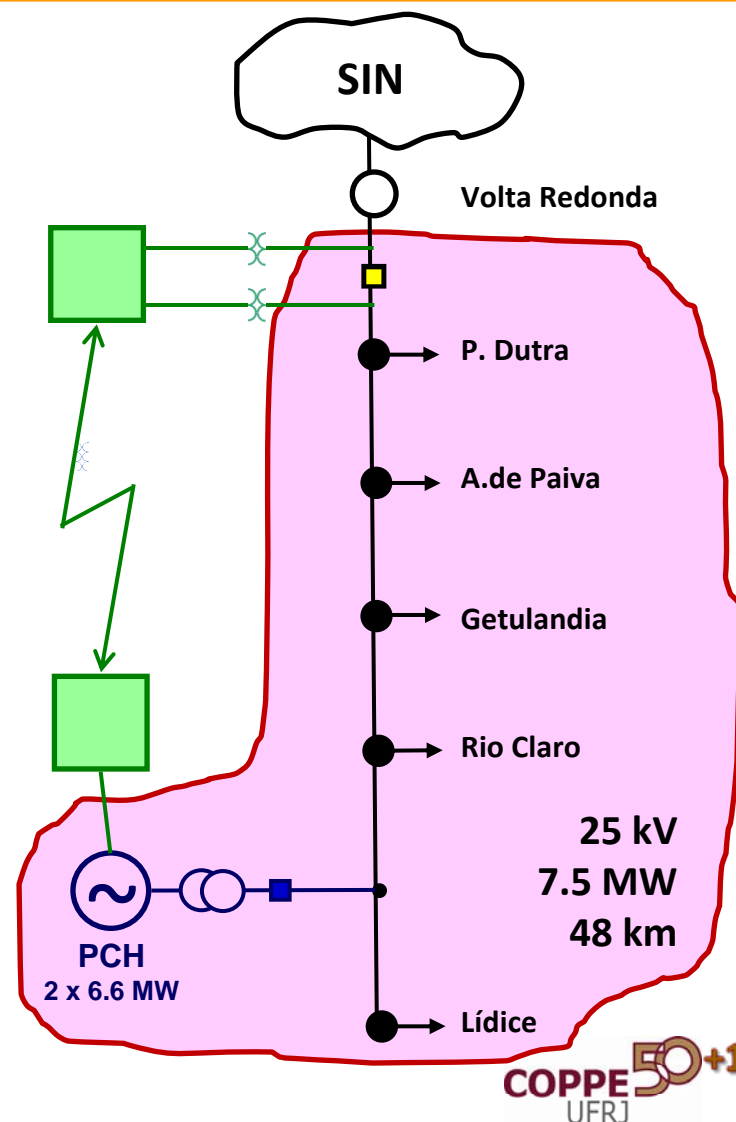
Exemplo de Microrrede da Concessionária

- Situada no município de Rio Claro RJ
- Estudos de ilhamento provocados pelo desligamento do alimentador (25 kV) na SE de Volta Redonda (138 kV)
- PCH com duas unidades de 6 MW cada
- Verificação da capacidade de alimentação da carga local



Estudos de Ilhamento

- Interesse da empresa em atender demanda local com a PCH para melhorar índices de confiabilidade
- Ilhamentos
 - Não-intencional (desligamento)
 - Intencional (manutenção, redução da demanda)
- Religamento
- Estudos de Simulação
 - Mostraram a viabilidade desde que introduzidos recursos mínimos de comunicação e automação
- Experimentos
 - Testes de ilhamento realizados com sucesso



Projeto CPQd-Celpe

■ Estudo do sistema elétrico da Ilha de Fernando de Noronha

- Condição atual
- Com a instalação de geração eólica e fotovoltaica
- Com recursos de Redes Elétricas Inteligentes (prova de conceito)

■ Tipos de Estudo

- Regime Permanente (Fluxo de Potência)
- Dinâmica Eletromecânica (Estabilidade Transitória)

■ Fenômenos Simulados

- Faltas
- Reconfiguração (recursos)
- Intermitência das fontes eólica e solar
- Recurso de automação e controle em ambiente de REI



REI em Sistemas de Transmissão

■ Identificação de Instabilidade de Tensão baseada em Medição Fasorial Sincronizada

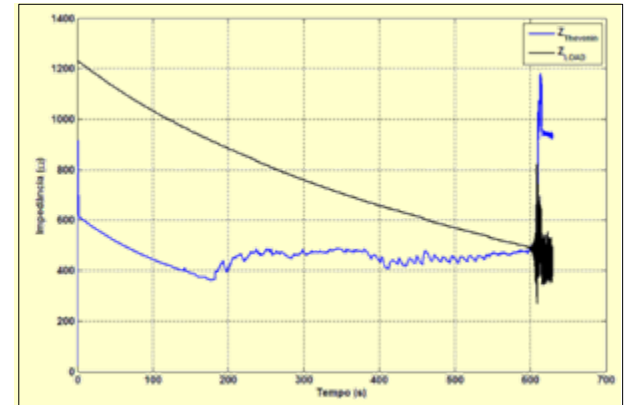
- Medição de fasores de corrente e tensão
- Equivalente de Thevenin
- Aproximação de Impedâncias

■ Estimação de Estado

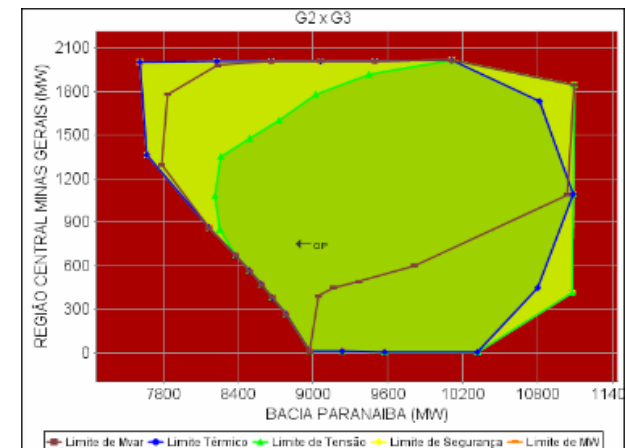
- Estimação de estado utilizando dados de PMUs
- Estimação de estado em redes de distribuição utilizando dados de AMI

■ Avaliação Dinâmica da Segurança do SIN

- Integração do softwares ANAREDE e ANATEM do CEPEL
- Ambiente de computação paralela (clusters)



CESI

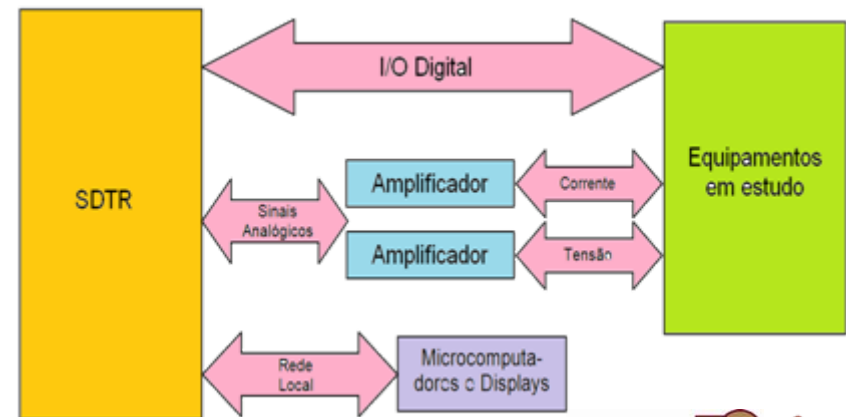


Eletrobras
Cepel

COPPE 50+1
UFRJ

Simulação em Tempo Real de Tecnologias de REI

- Laboratório de simulação de redes elétricas em tempo real
- Baseado em sistema computacional paralelo especialmente projetado para simulação de redes elétricas
- Facilidades para interagir com equipamentos (relés, conversores, pmus, etc)
- Hardware in the loop
- Projetos propostos
 - Simulação de Microrredes Conectadas a Redes de Distribuição de Energia Elétrica
 - Aplicações de Medição Fasorial Sincronizada na Monitoração e Controle de Sistemas de Transmissão



Bibliografia

Livros Internacionais

- J. Ekanayake, N. Jenkins, K. Liyanage, J. Wu, and A. Yokoyama, *Smart Grid: Technology and Applications*, Wiley, 2012.
- E.H. Zhu Han and H.V. Poor, *Smart Grid Communications and Networking*, Cambridge University Press, 2012.

Livros Nacionais

- J.C. Dutra, et al., *Redes Elétricas Inteligentes no Brasil: Subsídios para um Plano Nacional de Implantação*, Rio de Janeiro, Synergia Editora, 2013.
- N. Kagan, et al., *Redes Elétricas Inteligentes no Brasil: Análise de Custos e Benefícios de um Plano Nacional de Implantação*, Rio de Janeiro, Synergia Editora, 2013.
- F. Toledo, Coord., *Desvendando as Redes Elétricas Inteligentes*, Rio de Janeiro, Brasport, 2012.

Relatórios

- The SMART GRID: An Introduction, Department of Energy (DOE), USA, 2008.
- Technology Roadmap: Smart Grids, International Energy Agency (IEA), 2011.
- SmartGrids SRA 2035, European Technology Platform for Electricity Networks of the Future (SmartGrids ETP), March 2012.
- Smart Grid: Relatório do Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes do Ministério de Minas e Energia, 2012.
- Redes Elétricas Inteligentes: Contexto Nacional, relatório preparado pela CGEE, Dezembro de 2012.

Artigos

- S. Massoud Amin and B.F. Wollenberg, "Toward a Smart Grid: Power Delivery for the 21st Century", IEEE Power and Energy Magazine, vol. 3, no. 5, pp. 34-41, Sept./Oct. 2005.
- D.M Falcão, "Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid", Anais do III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 18-21 Maio, Belém PA, 2010.
- D.M. Falcão, "Smart Grids e Microredes: O Futuro já é Presente", Anais do VIII Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos (Simpase), Rio de Janeiro RJ, 09 a 14 de Agosto de 2009.

Internet

| | |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| IEEE | http://smartgrid.ieee.org/ |
| Department of Energy (USA) | http://www.smartgrid.gov/ |
| SGIC | http://www.sgicclearinghouse.org/ |
| NIST | http://www.nist.gov/smartgrid/ |
| Galvin Electricity Initiative | http://www.galvinpower.org/ |
| SG European Technology Platform | http://www.smartgrids.eu/ |
| Fórum Latino-Americano de Smart Grid | http://www.Smartgrid.com.br/ |
| Smartgrid News | http://smartgridnews.com.br/ |
| Redes Inteligentes | http://www.redeinteligente.com/ |
| Redes Inteligentes Brasil | http://redesinteligentesbrasil.org.br/ |

Obrigado

Djalma M. Falcão

falcao@nacad.ufrj.br

COPPE/UFRJ

Programa de Engenharia Elétrica

Caixa Postal 68504

21941-972 Rio de Janeiro RJ