

# PEA5918 – Redes Elétricas Inteligentes e Microrredes (*Smart Grids* e *Microgrids*)

## Componentes Avançados

Giovanni Manassero Junior

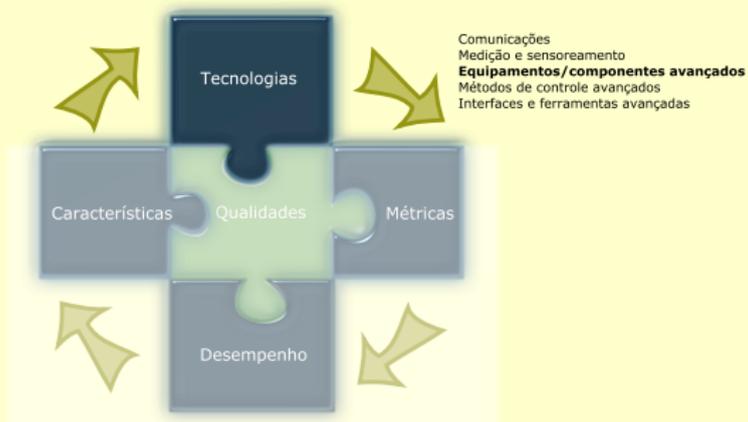
Depto. de Engenharia de Energia e Automação Elétricas  
Escola Politécnica da USP

Agosto/2011

# Tecnologias

## Viabilização das características

- As tecnologias chave, capazes de implementar as características básicas das redes elétricas inteligentes estão ilustradas a seguir.



# Componentes avançados

## Equipamentos e componentes avançados

- Equipamentos e componentes avançados podem ser utilizados para melhorar o desempenho global dos sistemas elétricos de potência;
- Esses equipamentos e componentes são resultado de pesquisa e desenvolvimento em:
  - Eletrônica de potência: contribui no desenvolvimento de novos equipamentos para compensação reativa (série e paralela), alimentação de sistemas de iluminação, etc.;
  - Ciência dos materiais: novos materiais para construção de máquinas elétricas, linhas de transmissão, transformadores, etc.;
  - Microeletrônica: equipamentos de sensoriamento e medição.

# Componentes avançados

## Eletrônica de potência

- *Flexible alternating current system devices* – FACTS são um bom exemplo de componentes avançados baseados na eletrônica de potência;
- FACTS são empregados em transmissão e distribuição com os seguintes objetivos:
  - Controle de tensão em condições de carga variável;
  - Melhoria nos índices de qualidade de energia;
  - Compensação reativa;
  - Transmissão em longas distâncias.

# Componentes avançados

## Eletrônica de potência

- Além dos FACTS, outro exemplo do uso da eletrônica de potência são os sistemas de transmissão em corrente contínua (*high voltage direct current* – HVDC);
- Esses sistemas são capazes de:
  - Viabilizar o acoplamento elétrico de sistemas em corrente alternada não sincronizados;
  - Minimizar os problemas de estabilidade relacionados com a transmissão em longas distâncias;
  - Aumentar a corrente de curto-circuito dos sistemas em malha.

# Componentes avançados

## Eletrônica de potência

- Dentre os equipamentos de eletrônica de potência empregados nos sistemas elétricos, pode-se destacar:
  - Reguladores de tensão;
  - Compensadores estáticos;
  - Compensadores síncronos estáticos (*static synchronous compensator* – STATCOM)
  - Controladores unificados de fluxo de potência (*unified power flow controller* – UPFC).

# Reguladores de tensão

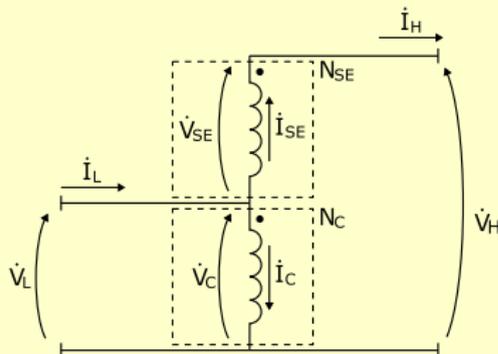
## Introdução

- O regulador de tensão é um equipamento que mantém um nível de tensão pré-determinado em um alimentador de distribuição, apesar das variações de carga;
- De um modo geral, o regulador de tensão é um autotransformador com comutação automática de tap, através de um comutador sob carga;
- Existem dois tipos de reguladores de tensão: *autobooster* e autotransformadores de trinta e dois degraus. Ambos são controlados automaticamente, a partir de técnicas específicas de controle.

# Autotransformadores

## Equacionamento

- A figura ilustra um autotransformador elevador:



- As relações entre tensões e correntes no autotransformador são:

$$\frac{\dot{V}_C}{\dot{V}_{SE}} = \frac{N_C}{N_{SE}} \quad \text{e} \quad \frac{\dot{I}_C}{\dot{I}_{SE}} = \frac{N_{SE}}{N_C}$$

# Autotransformadores

## Equacionamento (cont.)

- No circuito ilustrado, as relações de tensões e correntes ficam:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_L = \dot{I}_C + \dot{I}_{SE} \\ \dot{I}_H = \dot{I}_{SE} \\ \dot{V}_H = \dot{V}_C + \dot{V}_{SE} \end{array} \right.$$

- E, neste caso, a relação de transformação entre a entrada e a saída do autotransformador fica:

$$\frac{\dot{V}_L}{\dot{V}_H} = \frac{N_C}{N_C + N_{SE}} \quad \text{e} \quad \frac{\dot{I}_L}{\dot{I}_H} = \frac{N_C + N_{SE}}{N_C}$$

# Reguladores de tensão

## Aspectos construtivos

- Existem dois tipos de reguladores de tensão: *autobooster* e trinta e dois degraus;
- Os reguladores de tensão do tipo *autobooster* são monofásicos, de baixo custo, porém tecnicamente limitados. Desta forma, normalmente são empregados em áreas com baixa densidade de carga;
- Os reguladores de tensão do tipo trinta e dois degraus normalmente são trifásicos.

# Reguladores de tensão

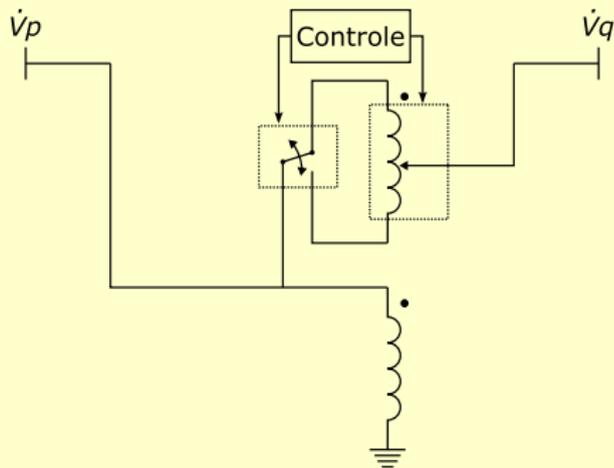
## Regulador de tensão de trinta e dois degraus

- O regulador de tensão de trinta e dois degraus possui trinta e dois tapes (dezesesseis tapes para abaixar a tensão e dezesesseis tapes para elevar a tensão);
- Desta forma é possível obter uma variação de tensão em cada tape, de  $\pm 0,65\%$ , totalizando uma variação de tensão de  $\pm 10\%$ ;
- O regulador de tensão possui um relé regulador de tensão, que monitora sua tensão de saída por meio de um TP, e decide comutar ou não o tape do equipamento, de forma a manter essa tensão próxima ao nível de tensão pré-ajustado.

# Reguladores de tensão

## Regulador de tensão de trinta e dois degraus (cont.)

- A figura ilustra o regulador de tensão de trinta e dois degraus:



# Compensadores estáticos

## Introdução

- Os compensadores estáticos são equipamentos que têm por objetivo controlar o nível de tensão em regime permanente e transitório, garantindo o fornecimento e/ou o consumo de reativos necessários para o pleno funcionamento do sistema de potência;
- A utilização desses equipamentos, em detrimento aos compensadores síncronos, deve-se às seguintes vantagens:
  - Custo reduzido e menores perdas;
  - Maior confiabilidade;
  - Tempo de resposta reduzido;
  - Ausência de inércia.

# Compensadores estáticos

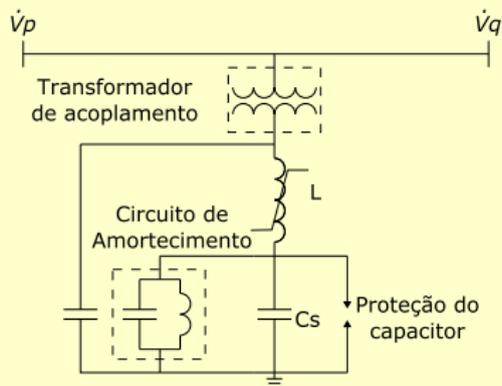
## Introdução (cont.)

- Entretanto, cabe ressaltar que os compensadores estáticos podem contribuir com a magnitude do conteúdo harmônico presente nos sistemas.
- Existem quatro tipos de compensadores estáticos, que são baseados nos seus aspectos construtivos:
  - Reator saturado;
  - Reator controlado por tiristor;
  - Capacitor chaveado por tiristor;
  - Combinação dos tipos acima.

# Compensadores estáticos

## Reator saturado

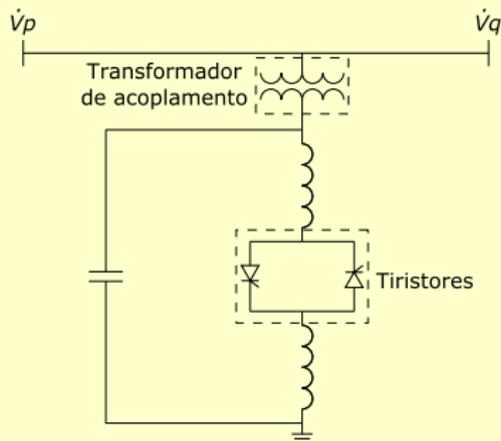
- O compensador estático de reator saturado foi o primeiro a ser desenvolvido e aplicado em sistemas de potência;
- Consiste de um reator saturado e um banco de capacitores fixo, ambos em série. O capacitor é protegido por um dispositivo (gap ou MOV);
- A figura ilustra o diagrama que representa esse tipo de compensador:



# Compensadores estáticos

## Reator controlado por tiristor

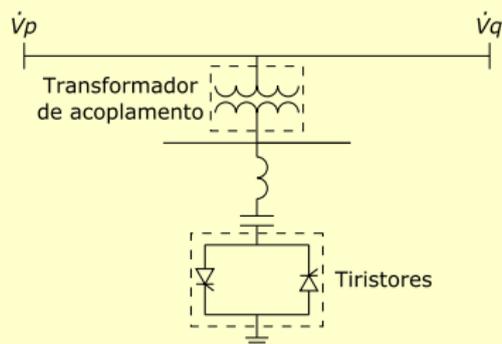
- Consiste na combinação de reatores lineares chaveados por tiristores na configuração de seis ou doze pulsos;
- São compostos em unidades monofásicas ligadas em delta;
- A figura ilustra o diagrama que representa esse tipo de compensador:



# Compensadores estáticos

## Capacitor chaveado por tiristor

- Consiste em capacitores chaveados por tiristores;
- Indutores são colocados em série com os capacitores para limitar a taxa de crescimento da corrente e prevenir a ressonância com o sistema;
- A figura ilustra o diagrama que representa esse tipo de compensador:



# Compensadores síncronos estáticos

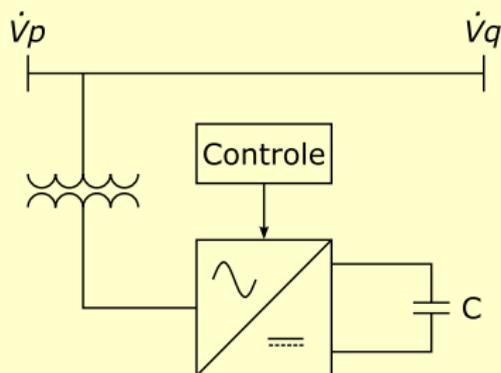
## Introdução

- Os compensadores síncronos estáticos são equipamentos de eletrônica de potência utilizados na compensação de potência reativa;
- Proporcionam o aumento do fluxo de potência nas linhas de transmissão e, como resultado, o aumento da estabilidade do sistema elétrico como um todo;
- Quando comparados com os compensadores síncronos rotativos, apresentam as seguintes vantagens:
  - Menor tempo de resposta;
  - Pouca manutenção;
  - Ausência de partes móveis (instabilidade rotacional);
  - Flexibilidade no controle, em tempo real, do fluxo de potência.

# Compensadores síncronos estáticos

## Aspectos construtivos

- O STATCOM possui um capacitor conectado a um inversor, que por sua vez está conectado a um transformador de acoplamento;
- O transformador de acoplamento é conectado ao sistema de potência, conforme ilustrado na figura.



# Controladores unificados de fluxo de potência

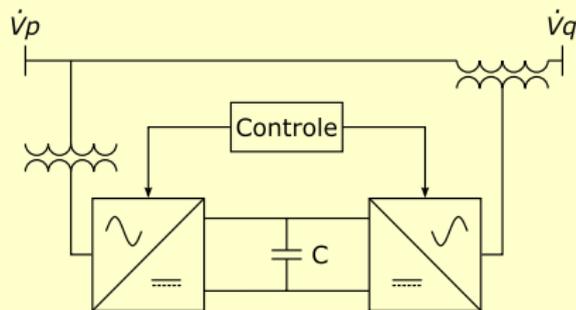
## Introdução

- Os controladores unificados de fluxo de potência (*unified power flow controller* – UPFC) são equipamentos de eletrônica de potência utilizados na compensação de potência reativa e no controle de fluxo de potência;
- Assim como o STATCOM, o UPFC proporciona o aumento do fluxo de potência nas linhas de transmissão e, como resultado, o aumento da estabilidade do sistema elétrico como um todo.

# Controladores unificados de fluxo de potência

## Aspectos construtivos

- O UPFC possui um STATCOM conectado a um inversor, que por sua vez está conectado a um transformador;
- Esse transformador é conectado em série ao sistema de potência, conforme ilustrado na figura.



# Supercondutores

## Introdução

- Materiais supercondutores têm resistividade zero a correntes baixas quando não há presença de campo magnético ou se o campo aplicado não excede um valor crítico;
- Os materiais supercondutores podem ser classificados conforme a sua “temperatura crítica”;
- Supercondutores de alta temperatura (*high temperature superconducting* – HTS) são aqueles que atingem o estado de supercondutividade quando refrigerados com nitrogênio líquido ( $T_c > 77K$ );
- O uso de nitrogênio líquido como meio refrigerante viabilizou a utilização comercial dos supercondutores.

# Supercondutores de alta temperatura

## Introdução

- Materiais supercondutores podem ser utilizados para a transmissão de grandes blocos de potência com correntes elevadas e tensões reduzidas;
- Como resultado, podem reduzir o congestionamento dos sistemas de transmissão sem a necessidade de construção de novas linhas, e aumentar a confiabilidade do sistema elétrico como um todo.
- Supercondutores de alta temperatura baseados no elemento químico bismuto (Bi-2212 e Bi-2223) são denominados supercondutores de primeira geração;
- Supercondutores de alta temperatura baseados nos elementos que compõem as terras raras (p. ex. ítrio, samário e gadolínio) são denominados supercondutores de segunda geração.

# Supercondutores de alta temperatura

## Características

- Supercondutores de primeira geração podem ser fabricados em escala industrial;
- Normalmente são empregados em regiões urbanas para a conexão de subestações congestionadas que se encontram próximas entre si;
- Supercondutores de segunda geração ainda se encontram em fase de desenvolvimento, porém já há algumas empresas comercializando esses produtos;
- Esses supercondutores possuem menor custo e melhor desempenho do que os supercondutores de primeira geração.

# Recursos energéticos distribuídos

## Introdução

- Recursos energéticos distribuídos caracterizam-se por unidades de geração e armazenamento na faixa de 3 [kW] a 10 [MW];
- Essas unidades normalmente são empregadas em edificações residenciais, comerciais e/ou industriais;
- Podem ser utilizadas como alternativa ou complementação ao fornecimento de energia elétrica tradicional.

# Recursos energéticos distribuídos

## Geração distribuída

- Atualmente existem algumas tecnologias de geração distribuída em uso, ou em projetos piloto:
  - Microturbinas;
  - Células combustíveis;
  - Células fotovoltaicas;
  - Turbinas eólicas;

# Geração distribuída

## Microturbinas

- Microturbinas são pequenas turbinas a combustão dedicadas à geração descentralizada de energia elétrica, que se encontram na faixa de 30 [kW] a 400 [kW];
- Consistem em um compressor, uma câmara de combustão, a turbina e o gerador;
- Normalmente essas turbinas operam em ciclo simples e os gases de escape são empregados para aquecimento de água (*combined heat and power* – CHP);
- São amplamente utilizadas em hospitais, sistemas isolados, para produção nos horários de ponta, etc.;
- Pode-se considerar que é uma tecnologia madura.

# Geração distribuída

## Células combustíveis

- Células combustíveis são células eletroquímicas que consomem um determinado combustível e produzem energia elétrica;
- O combustível típico é o elemento químico hidrogênio, que pode ser obtido a partir da eletrólise da água ou de outras moléculas (p. ex. metano);
- São altamente eficientes e pouco poluentes, porém o processo de “criação” do combustível pode reduzir o rendimento da conversão de energia;
- Ainda não há células combustíveis comercializadas em escala industrial.

# Geração distribuída

## Painéis fotovoltaicos

- Painéis fotovoltaicos são painéis compostos por células fotovoltaicas conectadas entre si, capazes de converter energia solar em energia elétrica;
- Não produzem emissões de gases do efeito estufa, apresentam um elevado nível de confiabilidade e requerem pouca manutenção;
- Existem inúmeros fabricantes que produzem painéis para aplicações residenciais, comerciais e industriais;
- Aplicações em sistemas isolados são bastante comuns (p. ex. satélites).

# Geração distribuída

## Turbinas eólicas

- É considerada a escolha mais econômica dentre as fontes renováveis de energia;
- Apresenta-se como uma alternativa ecológica;
- Existem vários fabricantes que produzem turbinas eólicas e o processo de desenvolvimento e aprimoramento das soluções é contínuo.

# Geração distribuída

## Comparação entre alternativas

- A seguir é apresenta-se a comparação entre algumas alternativas de geração distribuída.

Distributed Generation: A Comparison					
Technology	Recip Engine: Diesel	Recip Engine: NG	Microturbine	Combustion Gas Turbine	Fuel Cell
Size	30kW - 6+MW	30kW - 6+MW	30-400kW	0.5 - 30+MW	100-3000kW
Installed Cost (\$/kW)	600-1,000	700-1,200	1,200-1,700	400-900	4,000-5,000
Elec. Efficiency (LHV)	30-43%	30-42%	14-30%	21-40%	36-50%

# Armazenamento de energia

## Introdução

- Existem inúmeras possibilidades de armazenamento de energia para posterior conversão em energia elétrica:
  - Química: energia elétrica pode ser armazenada em baterias para utilização durante os horários de pico, de modo a aumentar o fator de carga e a qualidade da energia elétrica, mitigar os problemas de estabilidade de tensão e regulação de frequência;
  - Gravitacional: água pode ser bombeada para grandes reservatórios para posterior conversão em energia elétrica e consumo durante os horários de pico;

# Armazenamento de energia

## Introdução

- Existem inúmeras possibilidades de armazenamento de energia para posterior conversão em energia elétrica (cont.):
  - Cinética: energia elétrica pode ser armazenada em dispositivos mecânicos denominados *fly-wheels* para conversão em energia elétrica durante blecautes;
  - Elétrica: energia elétrica pode ser armazenada em supercapacitores para ser utilizada de maneira similar às baterias químicas;
  - Térmica: energia térmica pode ser armazenada em fluídos para posterior conversão em energia elétrica (p. ex. energia solar concentrada).

# Microrredes

## Características

- Microrredes são redes de energia elétrica com múltiplas unidades de geração, normalmente de pequeno porte, que podem operar de forma isolada ou integradas ao sistema elétrico interligado;
- Microrredes podem ser compostas por vários tipos de unidades de geração distintos e podem ou não incluir unidades de armazenamento de energia;
- Atualmente há projetos pilotos de microrredes com o objetivo de verificar sua viabilidade técnica e econômica.

# Condutores compostos

## Introdução

- Atualmente há novos materiais que podem ser empregados para a construção de sistemas de transmissão e redes de distribuição;
- Esses materiais são capazes de transportar grandes blocos de potência, quando comparados com os materiais convencionais;
- Desta forma, é possível aumentar o fator de utilização da faixa de passagem sem a necessidade de sua ampliação;
- ACCC (*aluminum conductor composite core cable*), ACCR (*aluminum conductor composite reinforced cable*) e ACSS/TW (*annealed aluminum, steel supported, trapezoid cross section conductor wire*) são exemplos de condutores que carregam o dobro da corrente dos condutores convencionais (ACSR – *aluminum cable steel reinforced*), suportam uma temperatura maior e estão em operação atualmente;

# Equipamentos controláveis

## Características

- Os avanços na tecnologia digital permitem a incorporação de mecanismos de controle nos mais diversos equipamentos;
- A possibilidade de comandar esses equipamentos permite que o nível de confiabilidade das redes elétricas aumente;
- Ainda não há instalações piloto suficientes que possam indicar o real potencial dessa possibilidade.

# Desempenho das redes elétricas

## Desenvolvimento e implantação dos componentes avançados

- Melhorias na qualidade de energia elétrica devem decorrer da utilização de novas tecnologias, bem como do melhor gerenciamento da relação produção vs. consumo;
- Aumento na capacidade de transmissão de energia elétrica como resultado da aplicação de novos tipos de condutores, de dispositivos de controle de tensão e de controle de reativos;
- Aprimoramento e implementação extensiva de dispositivos FACTS;
- Maior integração de recursos energéticos distribuídos e unidades de armazenamento de energia, com a aplicação de controle centralizado de despacho de potência.

# O papel da eletrônica de potência

## Desenvolvimento de novos materiais, técnicas e equipamentos

- O desenvolvimento do *unified power flow controller* é um exemplo da possibilidade de desenvolvimento de novos equipamentos;
- O estudo de novos materiais, que permitam a conexão direta dos equipamentos de eletrônica de potência aos sistemas elétricos com a utilização de configurações mais simples, pode reduzir custos;
- Um exemplo da aplicação de eletrônica de potência é o transformador eletrônico.

# O papel da eletrônica de potência

## Transformador eletrônico

- O transformador eletrônico consiste em um retificador e um inversor conectados ao primário de um transformador;
- O secundário desse transformador é então conectado a outro retificador e outro inversor;
- A vantagem desse arranjo é a diminuição do volume do transformador e a redução nas perdas em vazio.

# O papel dos supercondutores

## Utilização de supercondutores em novos equipamentos

- Além da utilização de supercondutores de alta temperatura para a transmissão de grandes blocos de potência, esses materiais estão sendo utilizados na construção de novos equipamentos:
  - Compensadores síncronos: atualmente há compensadores síncronos em escala industrial;
  - Motores e geradores síncronos: com o desenvolvimento e implantação de compensadores síncronos é provável que essa tecnologia seja empregada na construção de motores e geradores.

# O papel dos supercondutores

## Compensadores síncronos

- A seguir está ilustrado um compensador síncrono da *American Superconductor*.



# O papel dos supercondutores

## Compensadores síncronos

- Os benefícios da utilização de compensadores síncronos que utilizam supercondutores são:
  - Operação estável mesmo quando operando com potência nominal;
  - Minimização do consumo de energia quando em operação;
  - Manutenção reduzida dos enrolamentos do rotor.

# O papel dos veículos elétricos

## Nova carga para o sistema

- Veículos elétricos que possuem a capacidade de serem recarregados a partir das redes elétricas podem proporcionar uma redução significativa no consumo de petróleo;
- Porém podem afetar a operação dessas redes caso o número de veículos com essas características seja grande;
- Segundo estudos do departamento de energia dos Estados Unidos, uma penetração de mercado de 50% pode resultar em um aumento de 10% no consumo de energia elétrica per capita;
- Apesar disso, veículos elétricos podem contribuir para mitigar o problema do consumo durante os horários de pico.

# Benefícios

## Equipamentos e componentes avançados

- A utilização dos equipamentos e componentes descritos pode contribuir com a confiabilidade dos sistemas elétricos;
- Esse benefício decorre imediatamente da melhora no suporte de reativos proporcionado pelo uso dos FACTS;
- Além disso, os novos equipamentos contribuem para a redução das perdas técnicas e para a acomodação de recursos energéticos distribuídos, bem como unidades de armazenamento.

# Barreiras

## Equipamentos e componentes avançados

- A principal barreira para o desenvolvimento de novas tecnologias é o custo envolvido;
- Apesar dos programas de P&D existentes, há pouco interesse das concessionárias em investir em tecnologias emergentes;
- Esse fato decorre do risco associado ao investimento e da ausência de mecanismos de retorno desse investimento.

# Soluções

## Equipamentos e componentes avançados

- Para que seja possível implantar as redes elétricas inteligentes, deve-se investir no desenvolvimento dos sistemas integrados de comunicação, nos sensores e medidores e também nos equipamentos e componentes avançados;
- Esses elementos devem possibilitar uma operação mais eficiente, confiável e segura dos sistemas elétricos;
- Para tanto, é preciso que haja mecanismos de retorno do investimento em pesquisa.