

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

## Princípios de Automação de Sistemas de Distribuição

Giovanni Manassero Junior

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

Junho/2011

# Introdução

## O impacto da reestruturação do setor elétrico

- Os sistemas elétricos de potência foram concebidos para garantir o atendimento aos consumidores e a rentabilidade das concessionárias do setor elétrico, sem colocar em risco certos níveis de confiabilidade. A desregulamentação do setor elétrico impôs novos desafios a essas concessionárias:
  - Privatizações;
  - Garantias de manutenção e/ou ampliação dos níveis de confiabilidade praticados antes das privatizações;
  - Ampliação da informação aos consumidores;
  - Maximização do uso e vida útil dos ativos;
  - Qualidade de energia.

# Introdução

## O papel da automação e do controle

- Os sistemas de automação e o controle dos sistemas elétricos de potência podem viabilizar a rápida adequação a esse cenário e, eventualmente, garantir a adequação a cenários que podem evoluir ao longo dos anos;
- A utilização desses sistemas deve garantir a viabilidade econômica ao setor e o retorno adequado aos acionistas das empresas;
- Além disso, o processo de adequação a esses cenários, por meio do emprego de sistemas de automação e controle, não deve produzir impactos nos índices de qualidade de serviço das redes elétricas, nem nos seus índices de confiabilidade.

# Motivações para a automação da distribuição

## Considerações iniciais

- Os benefícios decorrentes do emprego de sistemas de automação e controle dos sistemas de distribuição de energia elétricas são inúmeros. Dentre eles pode-se destacar:
  - Aumento da confiabilidade das redes de distribuição;
  - Ampliação da eficiência na operação dos sistemas;
  - Extensão da vida útil dos ativos.

# Motivações para a automação da distribuição

## Aceitação dos sistemas de automação e controle

- A aceitação dos sistemas de automação e controle pelo setor elétrico não é unânime;
- As primeiras instalações produziram relações custo-benefício pouco favoráveis;
- Com a desregulamentação do setor elétrico e a redução no custo dos sistemas de automação e controle, nota-se uma maior receptividade à sua instalação.

# Motivações para a automação da distribuição

## Aceitação dos sistemas de automação e controle

- A implantação desses sistemas no topo da hierarquia de controle (grandes subestações, p. ex.) produz resultados mais evidentes, quando se procura apenas a relação custo-benefício;
- A extensão dessa implantação às redes de distribuição (pequenas subestações e alimentadores) não produz resultados tão evidentes e, portanto, a maioria das empresas que optou por sua instalação elaborou estudos de caso.

# Benefícios da automação da distribuição

## Redução nos custos de operação e manutenção (O&M)

- Aperfeiçoamento dos sistemas de gerenciamento de informações da empresa:
  - Aumento no uso e vida útil dos ativos;
  - Redução das perdas técnicas nos sistemas de distribuição;
  - Melhora nos sistemas de localização de faltas;
  - Redução dos tempos de interrupção do fornecimento de energia elétrica;
  - Ampliação da satisfação do consumidor.

# Benefícios da automação da distribuição

## Aumento da capacidade do sistema

- A operação eficiente dos sistemas de distribuição de energia elétrica garante a redução das margens de segurança;
- Como resultado, a capacidade usualmente empregada para garantir as margens de segurança pode ser utilizada para a ampliação do fornecimento de energia;
- A automação permite a reconfiguração das redes de distribuição de energia elétrica (manobra das cargas).



# Benefícios da automação da distribuição

## Aumento da confiabilidade do sistema

- O conceito de confiabilidade normalmente está associado ao conceito de qualidade de energia elétrica;
- Normalmente é tratado de maneira especial pois é um indicador importante do estado de operação dos sistemas elétricos;
- A automação permite a rápida identificação das faltas nos sistemas elétricos (permanentes e, eventualmente, transitórias).

# Benefícios da automação da distribuição

## Novos serviços

- Planejamento energético pelo lado da demanda: a automação da distribuição permite que a concessionária sinalize preços diversificados ao longo do dia, de modo a reproduzir adequadamente a relação entre a oferta e a procura de energia elétrica. Fica a critério do consumidor definir seu perfil de consumo de energia;
- Resposta pelo lado da demanda: ao invés de sinalizar preços variáveis ao longo do dia, a concessionária pode sinalizar duas tarifas distintas, com o objetivo viabilizar o *peak shaping*;
- Novos produtos, incorporados ao serviço de fornecimento (*Broadband Over Powerlines*, p. ex.): o emprego de automação da distribuição permite que serviços sejam incorporados ao fornecimento de energia elétrica, utilizando a mesma infraestrutura.

# Benefícios da automação da distribuição

## Qualidade de energia elétrica

- O aumento do uso de equipamentos eletrônicos, que normalmente são sensíveis a eventos relacionados à qualidade de energia elétrica (*sag*, *swell*, conteúdo harmônico, desbalanceamento de tensões, etc.), indica a necessidade de mitigação dos problemas relacionados a esses eventos;
- Sistemas de automação e controle de energia elétrica possuem funções de registro oscilográfico dos sinais de tensões e correntes (além de outros registros), que podem ser utilizados para analisar o nível de qualidade de energia das redes elétricas;
- A análise dos níveis de qualidade pode indicar quais ações devem ser tomadas para reduzir os problemas associados.

# Benefícios da automação da distribuição

## Engenharia de planejamento

- A utilização de sistemas de automação e controle pode contribuir com o aperfeiçoamento da percepção dos sistemas elétricos de potência;
- Como resultado, os engenheiros envolvidos nos processos de especificação para os projetos de manutenção e ampliação dos sistemas podem contribuir de forma mais efetiva;
- Além disso, a percepção aprimorada dos sistemas contribui significativamente com a melhora na gestão dos ativos das concessionárias.

# Motivações para a automação da distribuição

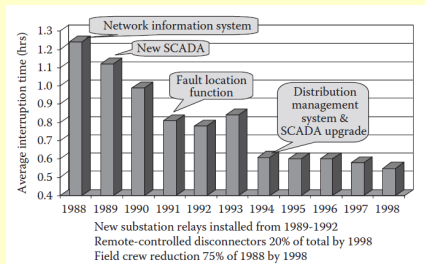
## Benefícios

Camada da hierarquia	Redução em O&M	Aumento da capacidade	Aumento da confiabilidade	Novos Serviços	Qualidade de energia	Engenharia de planejamento
Empresa	X			X		X
Sistema	X	X	X		X	X
Subestação	X	X	X		X	X
Alimentador	X	X	X		X	X
Cliente	X	X	X	X	X	X

# Motivações para a automação da distribuição

## Implementação incremental

- Os benefícios proporcionados pelo uso de sistemas de automação e controle são obtidos à medida que cada função nova é adicionada ao sistema já existente;
- Esse procedimento incremental implica o acúmulo de benefícios ao longo do tempo.



# Motivações para a automação da distribuição

## Aceitação por parte das concessionárias de energia elétrica

- A avaliação do grau de automação e controle empregado pelas empresas do setor elétrico não é tarefa fácil;
- A estratégia de implantação desses sistemas e as diferentes interpretações das concessionárias impedem que haja um consenso quanto a esse grau;
- Além disso, as políticas de cada região/nação impõem pressões diferentes às concessionárias e, como resultado, há diversas implantações distintas.

# Motivações para a automação da distribuição

## Aceitação por parte das concessionárias de energia elétrica

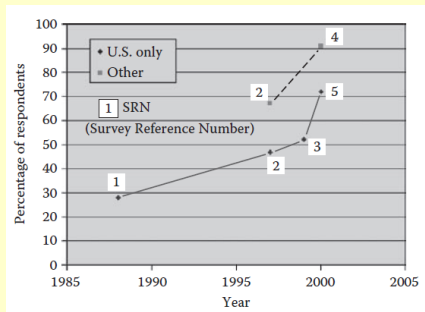
- Normalmente as pressões podem ser “pontuais” ou “graduais”;
- No primeiro caso, as concessionárias podem ser obrigadas a melhorar os índices de qualidade de fornecimento de energia em regiões que possuem altas taxas de falha enquanto, no segundo caso, as concessionárias podem ser obrigadas a melhorar esses índices em um prazo determinado.



# Motivações para a automação da distribuição

Aceitação por parte das concessionárias de energia elétrica

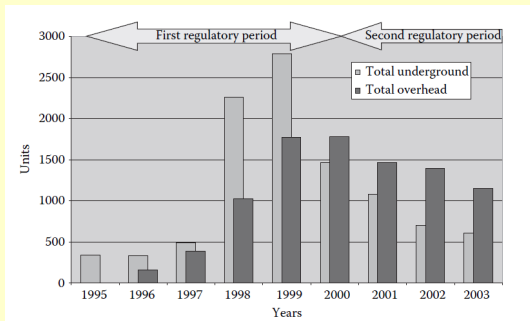
- Percentual de empresas que possuem automação, considerando apenas as empresas que responderam ao questionário (quinhentas empresas nos Estados Unidos e trinta e oito no restante do mundo).



# Motivações para a automação da distribuição

## O impacto da estruturação do setor elétrico

- Número de chaves automatizadas nas empresas do setor elétrico do Reino Unido.

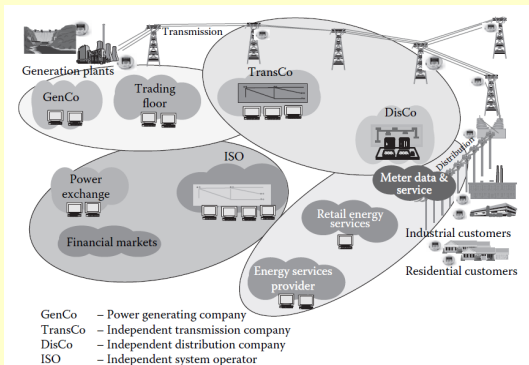


Obs.: A primeira fase da reestruturação consistiu na privatização e desverticalização, enquanto a segunda-fase consistiu na liberdade de escolha do consumidor, quanto ao fornecedor de energia elétrica.

# Sistemas de distribuição de energia elétrica

## Estrutura dos sistemas elétricos da atualidade

- A figura ilustra um sistema elétrico hipotético, após a desregulamentação do setor elétrico.



# Sistemas de distribuição de energia elétrica

## Estrutura dos sistemas elétricos da atualidade

- Com a desverticalização das empresas do setor de energia elétrica, os sistemas de automação e controle das concessionárias de transmissão ficaram responsáveis por responder conforme a disponibilidade de energia fornecida pelas usinas geradoras;
- Uma vez que a disponibilidade de energia elétrica depende da estratégia de mercado das usinas geradoras, os sistemas de automação e controle devem considerar esse aspecto;
- Sendo assim, os sistemas de automação e controle devem considerar que há variação no preço da energia elétrica, fornecida pelas diversas usinas conectadas ao sistema, para a operação do sistema conforme as regras atuais.

# Sistemas de distribuição de energia elétrica

## Estrutura dos sistemas elétricos da atualidade

- No caso das empresas de distribuição de energia elétrica, os sistemas de automação e controle estão associados diretamente aos índices de qualidade de serviço da rede (usualmente as redes de distribuição são radiais, e não possuem unidades geradoras a elas conectadas).

# Hierarquia de controle

## Definições

- A hierarquia de controle dos sistemas de potência deve se adequar à estrutura desses sistemas. Isto requer que os sistemas de potência possam ser controlados a partir de um único local, o centro de controle, ou a partir de diversos centros de operação;
- Usualmente definido como telecontrole ou SCADA, essa hierarquia de controle depende de canais de comunicação estabelecidos entre os elementos a serem controlados (geradores, disjuntores, *tap changers*) e o(s) centro(s) de controle;
- Para tanto, os elementos a serem controlados devem ser dotados de sensores e atuadores, capazes de ser controlados externamente, por meio de um equipamento específico.

# Hierarquia de controle

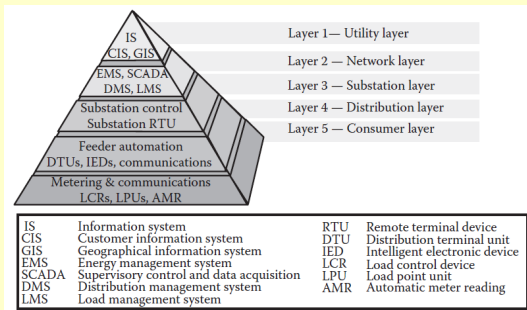
## Definições

- Esse equipamento, denominado *Intelligent Electronic Device* (IED) se comunica com o sistema de controle da sala de controle, por meio de um canal de comunicação. A esse sistema dá-se o nome de SCADA (*Supervisory Control & Data Aquisition*);

# Hierarquia de controle

## Estrutura típica

- A estrutura típica da hierarquia de controle dos sistemas de potência está ilustrada a seguir.





# Hierarquia de controle

## Camadas

- Empresa: a camada superior da hierarquia deve cobrir os sistemas de informação, gerenciamento de ativos, sistemas de comercialização de energia elétrica, etc.
- Sistema: historicamente consiste no sistema de transmissão interligado;
- Subestação: composta pelos equipamentos instalados nas subestações, com seus respectivos dispositivos de comando e controle;
- Alimentador: corresponde aos sistemas primários de distribuição (alimentadores, dispositivos de proteção, transformadores, etc.);
- Consumidor: composta pelos consumidores conectados à camada “Alimentador”.

# Automação da distribuição

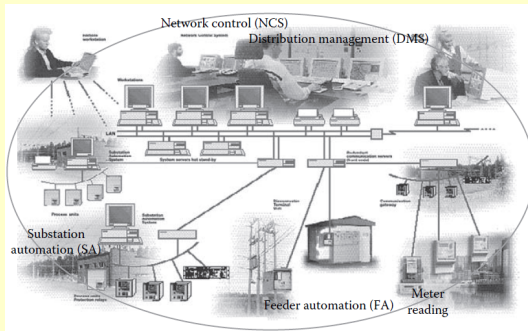
## Conceitos e definições

- O conceito de automação da distribuição é bastante amplo, e cobre desde os sistemas de automação e controle das empresas de distribuição, até a implantação de soluções de automação para equipamentos já existentes;
- O conceito de automação da distribuição se aplica a todo o sistema de operação da distribuição, incluindo as funções desempenhadas pelos sistemas de proteção e pelo SCADA;
- É importante ressaltar que, apesar desse conceito bastante amplo, normalmente os sistemas de proteção são tratados de forma diferenciada.

# Automação da distribuição

## Conceitos e definições

- A estrutura típica da hierarquia de controle dos sistemas de potência está ilustrada a seguir.



# Automação da distribuição

## Conceitos e definições

- O conceito de automação da distribuição engloba dois outros conceitos:
  - Sistemas de gerenciamento da distribuição (DMS): são os sistemas do centro de controle (visão *as-operated* da rede);
  - Sistema de automação da distribuição (DAS): imediatamente inferior ao DMS, porém inclui todos os equipamentos passíveis de telecontrole (essencialmente é uma espécie de DMS).

# Sistema de automação da distribuição

## Conceitos e definições

- A automação da distribuição cobre um amplo número de implementações, desde um simples *retrofit* de um controle remoto até a integração de IED's;
- O termo *automação* já implica o fato de que os processos são “autocontrolados”;
- A definição comumente empregada pelo setor elétrico é:  
*“Automação é um conjunto de tecnologias que permitem que uma empresa seja capaz de monitorar, coordenar e operar os componentes dos sistemas de distribuição, em tempo real, de locais remotos.”*

# Sistema de automação da distribuição

## Conceitos e definições

- O que diferencia o sistema de automação da distribuição dos sistemas baseados nos dispositivos de proteção é a possibilidade de monitoramento, coordenação e operação remotas;
- Isto significa que sistemas de automação da distribuição são totalmente dependentes dos sistemas de comunicação;
- O termo “tempo-real” está vinculado à função de automação e controle (proteção do sistema elétrico, p. ex.).

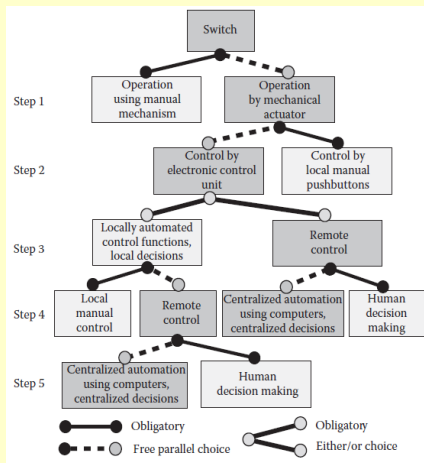
# Sistema de automação da distribuição

## Detalhes

- Independente das camadas de controle existentes, há basicamente três formas de utilizar a automação (mutuamente não exclusivas):
  - Automação local: as decisões quanto a operação de disjuntores e chaves é tomada pelos dispositivos de proteção, quando da ocorrência de faltas e/ou por solicitações efetuadas no próprio equipamento;
  - Telecontrole (SCADA): as decisões quanto a operação de disjuntores e chaves é efetuada remotamente, porém manualmente, e há o monitoramento dos sinais de estado, alarmes, medidas, etc.;
  - Automação centralizada: as decisões quanto a operação de disjuntores e chaves é efetuada remotamente e automaticamente.

# Sistema de automação da distribuição

Árvore de decisões quanto à automação de um dispositivo





# Sistema de automação da distribuição

## Árvore de decisões quanto à automação de um dispositivo

- Passo 1: prover o dispositivo com atuadores mecânicos;
- Passo 2: associar os atuadores mecânicos a unidades de controle;
- Passo 3: integrar as unidades de controle aos centros de operação e/ou prover inteligência local às unidades para garantir a operação desassistida;
- Passo 4: adicionar o controle remoto à automação local ou implementar lógicas de controle remoto utilizando ferramentas de apoio à decisão;
- Passo 5: implementar lógicas de controle remoto utilizando ferramentas de apoio à decisão.

# Sistema de automação da distribuição

## Resultado da árvore de decisões

- O dispositivo deve possuir a capacidade de controle e operação remotos;
- A tomada de decisões pode ser implantada da seguinte maneira:
  - Localmente, por meio do uso de IED's;
  - De maneira centralizada, utilizando-se sistemas de automação da distribuição;
  - Por meio de uma combinação das duas alternativas anteriores.
- A intervenção humana tem precedência sobre a automação, seja localmente e/ou remotamente;
- O dispositivo deve permitir a operação local, seja mecanicamente ou por meio de *pushbuttons*);

# Sistema de automação da distribuição

## Estágios de desenvolvimento

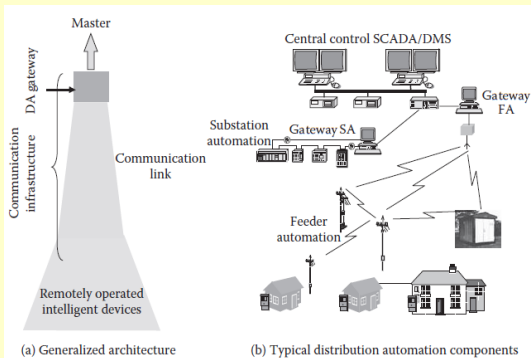
- Os estágios de desenvolvimento dependem exclusivamente da capacidade dos canais de comunicação entre as subestações e os dispositivos e os centros de controle.

Automation functions	Automation stage		Local (automation) decision making
	Stage 1	Stage 2	
Indications	Digital communications only	Digital and analog communications	Digital input-based logic
Status			Protection-based logic
Control	Upgrade path dependent on communication protocol and media infrastructure selected for Stage 1	Analog input-based logic	
Alarms			
Thresholds	Digital event driven	Digital event and analog measurement driven	
Voltage			
Current	DA server/gateway	Distribution management system	
FPI			
Measurements			
Current			
Voltage			
PQ			
Oscillographics			
Centralized decision making			
Platform			

# Arquitetura básica e estratégias de implementação

## Arquitetura

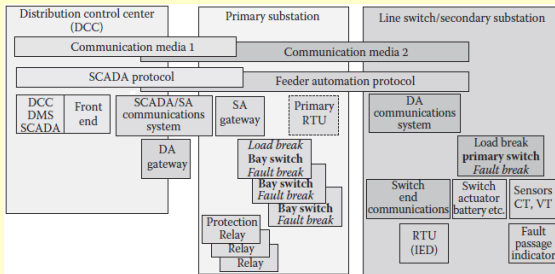
- A arquitetura básica dos sistemas de automação da distribuição está apresentada na figura.



# Arquitetura básica e estratégias de implementação

A criação de uma solução de automação da distribuição

- A criação de uma solução de automação da distribuição depende da integração de diversos elementos.



# Automação dos equipamentos elétricos

## Preparo para a automação

- A implantação de sistemas de automação da distribuição não depende apenas da arquitetura escolhida e do nível de automação que se pretende atingir (AIL - *Automation Intensity Level*);
- Depende também da disponibilidade de modificações nos ativos da empresa, para que acomodem a automação;
- Uma vez que as licitações normalmente são direcionadas à compra de equipamentos, e não sistemas, pode-se enfrentar outros problemas (interoperabilidade, p. ex.);
- O problema de interoperabilidade pode ser mitigado com a seleção de equipamentos que atendam a normas amplamente estabelecidas, aliada a testes com instalações piloto.

# Considerações iniciais

## Introdução

- Os sistemas de controle e gerenciamento central, de qualquer concessionária de energia elétrica, são responsáveis pela execução de todas as estratégias de operação e coordenação (técnicas e econômicas);
- Mesmo que essa concessionária utilize centros de controle distribuídos, as decisões desses centros devem ser comunicadas ao nível hierárquico superior, de modo a garantir a centralização das estratégias de operação e coordenação.

# Emprego de sistemas de controle

## Motivação

- Existem duas grandes motivações para o emprego dos sistemas de controle:
  - A desregulamentação do setor elétrico, que têm resultado em privatizações, desverticalizações, livre acesso à infra-estrutura;
  - Ampliação da percepção dos consumidores, que impõem pressões nas concessionárias do setor para a manutenção e/ou ampliação da qualidade do fornecimento de energia elétrica, independentemente das mudanças de cenário.



# Operação dos sistemas elétricos de potência

## Introdução

- De um modo geral, a operação dos sistemas elétricos de potência consiste na atividade de produção, transmissão e distribuição da energia elétrica aos consumidores finais;
- Por essa razão, a operação desses sistemas requer o equilíbrio entre segurança, economia e qualidade de energia;
- Do ponto de vista técnico, o equilíbrio depende apenas das características das usinas geradoras de energia elétrica (matéria prima e capacidade total), estrutura e condições de operação do sistema de entrega dessa energia, e características da demanda;
- Porém, atualmente deve-se considerar também as regras impostas pelo mercado de energia elétrica.

# Operação dos sistemas elétricos de potência

## Introdução

- Historicamente os sistemas de automação controle (SCADA) foram implantados nos sistemas interligados, de modo a garantir a operação econômica desses sistemas, considerando as margens de segurança e a qualidade da energia entregue aos consumidores;
- Os avanços dos sistemas digitais (*hardware* e *software*) permitiram a criação de funções de apoio à decisão;
- A evolução natural dessas funções solicita níveis cada vez mais elevados de automação para garantir seu desempenho.

# Operação dos sistemas elétricos de potência

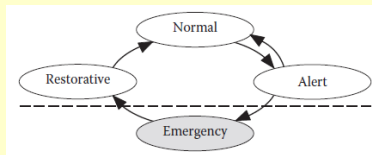
## Introdução

- As funções de apoio à decisão podem ser divididas em grupos, de acordo com o seu horizonte de tempo:
  - Operação instantânea: envolve o monitoramento, em tempo real, do estado dos sistemas elétricos (geração de energia, fluxo de carga, níveis de tensão, etc.);
  - Planejamento da operação: o planejamento de curto prazo é crucial para a operação econômica das usinas de geração. Desta forma, deve-se proceder com a previsão de carga para garantir o melhor ponto de operação dessas usinas;
  - Relatórios de operação: reflete a necessidade de registrar os índices de desempenho, de taxa de falhas e o carregamento das redes, para efeito de planejamento a longo prazo.

# Operação dos sistemas elétricos de potência

## Estados de operação dos sistemas

- Os estados de operação dos sistemas elétricos de potência estão resumidos a seguir.



# Ambiente de operação dos sistemas de distribuição

## Panorama atual

- Atualmente, a operação das redes de distribuição, principalmente as redes radiais, requer intervenção humana para a tomada de decisão e o restabelecimento do fornecimento de energia elétrica;
- Redes de distribuição cobrem áreas muito extensas e, portanto, as atividades de tomada de decisão e restabelecimento do fornecimento de energia requerem a análise de uma grande quantidade de dados.

# Ambiente de operação dos sistemas de distribuição

## Panorama atual

- Este ambiente de operação se reflete nas atividades dos operadores das redes de distribuição:
  - Operação normal da rede: os operadores devem conciliar as atividades de manutenção programada com o monitoramento das condições das redes;
  - Contingências: o primeiro objetivo é restaurar o fornecimento de energia elétrica. Isto envolve a preparação e execução de manobras nos disjuntores e/ou chaves na tentativa de isolar o ponto de ocorrência do defeito;
  - Administração: consiste nas atividades de registro de eventos, elaboração de relatórios de operação, análise estatística de desempenho, etc.

# Ambiente de operação dos sistemas de distribuição

## Sistemas de gerenciamento da distribuição

- Os sistemas de gerenciamento da distribuição devem fornecer subsídios aos operadores, no desenvolvimento das tarefas apresentadas;
- Os subsídios à operação normal e à operação sob contingências depende do nível de automação das redes de distribuição;
- Entretanto, caso esse nível seja baixo, os sistemas de gerenciamento da distribuição devem utilizar outras ferramentas de suporte. São elas:
  - Informações geográficas da rede e diagramas de operação;
  - Gerenciamento das turmas de manutenção;
  - Gerenciamento das ligações de consumidores;
  - Comunicação.

# Sistemas de gerenciamento da distribuição

## Evolução

- Antes da implantação dos sistemas de gerenciamento da distribuição, as concessionárias efetuavam a gestão das suas redes de distribuição a partir de quatro atividades distintas:
  - Operação;
  - Gerenciamento de ativos;
  - Engenharia;
  - Negócios.



# Sistemas de gerenciamento da distribuição

## Operação

- É a atividade que consiste na operação das redes elétricas em condições normais e contingências, com o objetivo de manter os índices de continuidade de serviço;
- Sistemas SCADA instalados em subestações de grande importância são empregados como suporte a essa atividade;
- As atividades de operação das subestações restantes, bem como dos alimentadores, empregam diagramas elétricos e mapas.

# Sistemas de gerenciamento da distribuição

## Gerenciamento de ativos

- É a atividade que consiste no controle de inventário dos ativos da empresa, construção e manutenção das redes elétricas, gestão dos diagramas, desenhos, documentos e mapas das redes, etc.;
- Sistemas de informação geográfica (GIS) foram desenvolvidos com o objetivo de dar suporte a essa atividade, substituindo os sistemas AM/FM (*Automated Mapping Facilities Management*);
- As atividades de operação das subestações restantes, bem como dos alimentadores, empregam diagramas elétricos e mapas.

# Sistemas de gerenciamento da distribuição

## Engenharia

- É a atividade que consiste no planejamento e projeto de novos alimentadores e subestações, bem como no projeto e planejamento de expansões da rede existente;
- Ferramentas de análise de redes podem ser empregadas na tarefa de planejamento da expansão;
- Essas ferramentas podem auxiliar no desenvolvimento de soluções que aumentem a confiabilidade do sistema existente, ou a carga por ele atendida, com o menor custo possível.

# Sistemas de gerenciamento da distribuição

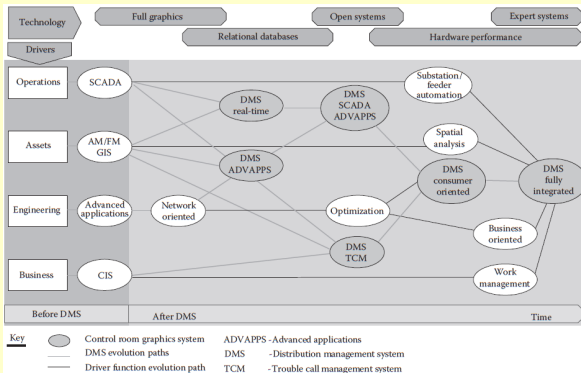
## Negócios

- Consiste nas atividades comerciais e de contabilidade da empresa;
- Para os operadores das redes de distribuição, as informações sobre os consumidores são de particular importância para o atendimento às chamadas de emergência;
- Essas informações normalmente estão contidas nos sistemas de informações dos consumidores ou nos sistemas de gerenciamento das relações com os consumidores.

# Sistemas de gerenciamento da distribuição

## Evolução dos sistemas

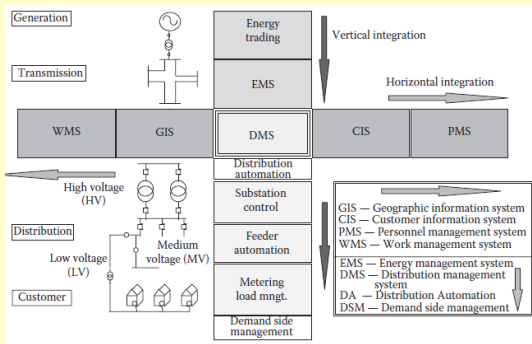
- As funções básicas, bem como suas relações e caminhos evolutivos, estão ilustrados na figura a seguir.



# Sistemas de gerenciamento da distribuição

## Integração horizontal e vertical dos sistemas

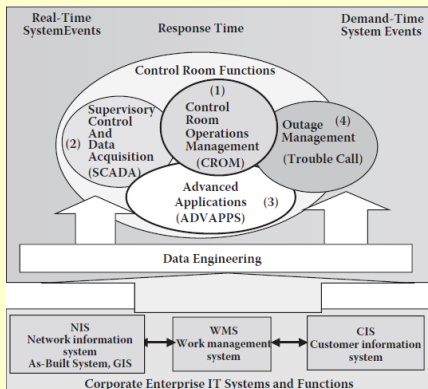
- As diversas funções dos sistemas de gerenciamento da distribuição guardam relações entre si, conforme ilustrado.



# Sistemas de gerenciamento da distribuição

## Funções básicas

- As funções dos sistemas de gerenciamento da distribuição podem ser agrupadas conforme apresentado a seguir.



# Sistemas de gerenciamento da distribuição

## CROM - Gerenciamento das operações do centro de controle

- Visualização do diagrama elétrico das redes de distribuição;
- Interface com o SCADA;
- Funções avançadas (serviços de gerenciamento das chamadas de emergência e das interrupções de fornecimento);
- Interface com os dados da engenharia para leitura e/ou modificações nesses dados.



# Sistemas de controle em tempo real

## Introdução

- Os sistemas de controle em tempo real utilizam o SCADA para efetuar a aquisição de diferentes fontes de dados, pré-processamento e armazenagem nas bases de dados. As funções básicas dos sistemas SCADA são:
  - Aquisição de dados;
  - Monitoramento e processamento de eventos;
  - Controle;
  - Análise e armazenagem de dados;
  - Suporte à decisão;
  - Elaboração de relatórios.

# Sistemas de controle em tempo real

## Aquisição de dados

- O estado dos sistemas elétricos de potência são coletados pelo SCADA nos diversos equipamentos monitorados;
- Além disso, o SCADA também registra as ações dos operadores e as manobras das equipes de manutenção em campo, quando informadas ao sistema;
- Essas fontes de dados são tratadas da mesma maneira e fornecem subsídios para a determinação do estado de operação das redes;
- Normalmente, as informações coletadas pelo SCADA são: indicações de estado, valores medidos e valores de energia para efeitos de tarifação.

# Sistemas de controle em tempo real

## Processamento de eventos e monitoramento

- A coleta e armazenagem dos dados, pelo SCADA, não implica conhecimento do estado operativo das redes elétricas;
- Para obter esse conhecimento, deve-se processar as informações;
- O monitoramento das indicações de estado consiste na comparação do estado atual com o estado anterior. Cada mudança de estado pode resultar na notificação do operador e/ou na execução de alguma rotina automática;
- O monitoramento dos valores medidos consiste na comparação desses valores com referências pré-definidas. É necessário também utilizar alguma espécie de ciclo de histerese para evitar um número excessivo de alarmes.

# Sistemas de controle em tempo real

## Controle

- Funções de controle normalmente são iniciadas pela ação dos operadores e/ou por aplicativos de *software*. Estas ações afetam diretamente a operação das redes elétricas;
- As funções de controle podem ser agrupadas conforme:
  - Controle individual: consiste no controle do estado de um determinado equipamento (abertura/fechamento de chaves);
  - Mensagem para regulação: consiste no controle da operação de um equipamento (*tap changer*);
  - Controle sequencial: consiste numa sequência de ações definidas previamente, que são executadas após um comando de início (*load shedding*, falha de disjuntor);
  - Controle automático: consiste no controle do tipo “mensagem para regulação”, porém em malha fechada.

# Sistemas de controle em tempo real

## Arquivamento de dados e análise

- Os dados coletados pelo SCADA são armazenados em uma base de dados, que fornece uma imagem atualizada do estado do sistema supervisionado;
- Esses dados são atualizados periodicamente e são utilizados em análises estatísticas que representam o comportamento do sistema em questão;
- A base de dados pode ser empregada também na análise de eventos após a sua ocorrência (p. ex. análise de eventos de curto-circuito).



# Sistemas de controle em tempo real

## Princípios dos sistemas SCADA

- As limitações dos sistemas de comunicação, em termos de velocidade de transferência de dados, foi um dos fatores que contribuiu decisivamente para a arquitetura desses sistemas quando empregados na automação e controle de sistemas elétricos de potência;
- Devido a essa limitação, seria impossível enviar os dados sobre medições e estados dos equipamentos das subestações, diretamente para o centro de controle;
- Desta forma, a função de aquisição de dados efetua a coleta dos dados com a maior velocidade possível e os registra em uma base. Os operadores visualizam o estado do sistema a partir dos dados fornecidos por essa base;
- Atualmente existem alternativas de comunicação mais poderosas.

# Sistemas de controle em tempo real

## Princípios de polling dos sistemas SCADA

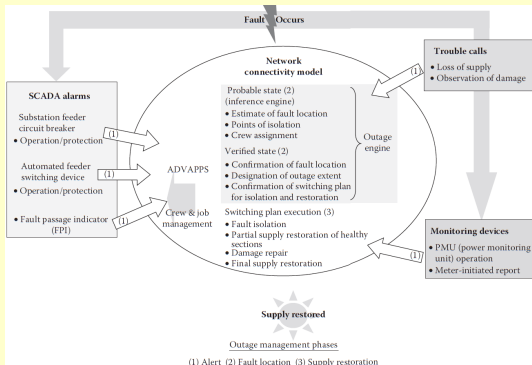
- Existem dois tipos básicos de obtenção dos dados das unidades terminais remotas:
  - Cíclico: os estados e medidas coletados pelas unidades terminais remotas são fornecidos pelas unidades ao *front end* quando solicitado. A frequência de solicitação depende da configuração do sistema e da disponibilidade do canal de comunicação;
  - *Report-by-Exception*: os *front ends* efetuam a solicitação de envio de mensagens às unidades terminais remotas, porém esse envio ocorre apenas se houver alguma mudança nos dados armazenados pelas unidades. Por essa razão as mensagens não têm formato definido e devem ser devidamente identificadas.



# Sistemas de gerenciamento de interrupções

## Introdução

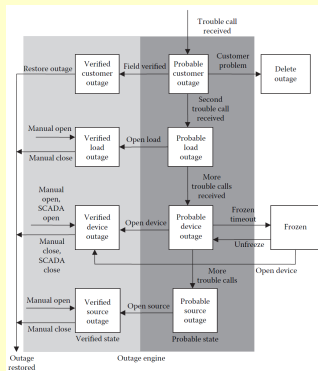
- Os sistemas de gerenciamento de interrupções tradicionais são representados pela figura a seguir.



# Sistemas de gerenciamento de interrupções

## Ligações telefônicas dos consumidores afetados

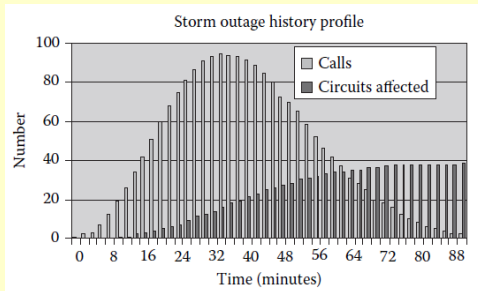
- O sistema baseado em ligações telefônicas dos consumidores afetados pode ser exemplificado por meio do fluxograma a seguir.



# Sistemas de gerenciamento de interrupções

## Perfil das ligações telefônicas dos consumidores afetados

- A seguir é apresentado o perfil de ligações dos consumidores afetados após a ocorrência de um evento de grande escala.



# Sistemas de gerenciamento de interrupções

## GIS vs. SCADA

- Existem duas formas de se implantar sistemas de gerenciamento de interrupções por meio de ligações de emergência: sistemas baseados no GIS e sistemas baseados no SCADA;
- Sistemas baseados no GIS utilizam modelos de inferência para identificação dos trechos prováveis de ocorrência da falta;
- Sistemas baseados no SCADA utilizam os dados de campos (tensões e correntes, estado de dispositivos de proteção, etc.) para identificação dos trechos prováveis de ocorrência da falta;
- Existe a alternativa de utilizar um procedimento combinado. Porém esse procedimento depende da consistência dos dados de ambos os sistemas.

# Sistemas de gerenciamento de interrupções

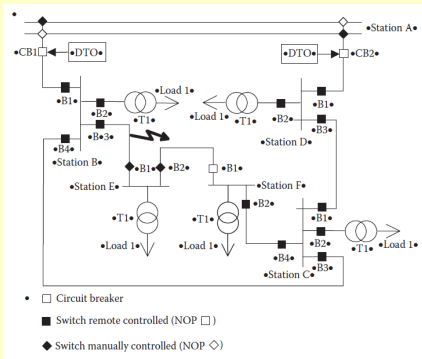
## Gerenciamento de interrupções baseado em aplicações avançadas

- Existem linhas de pesquisa para o desenvolvimento de sistemas de localização de faltas em redes de distribuição;
- Normalmente esses sistemas utilizam algoritmos de localização de faltas baseados em registros oscilográficos de tensões e correntes efetuados por IED's instalados nas subestações;
- Em sistemas radiais, a maioria dos algoritmos apresenta mais de um ponto provável de ocorrência do defeito (equivalência elétrica);
- Utilizam-se outros dados e/ou ferramentas para classificar os pontos prováveis por ordem de probabilidade.

# Sistemas de gerenciamento de interrupções

## Restauração do fornecimento de energia

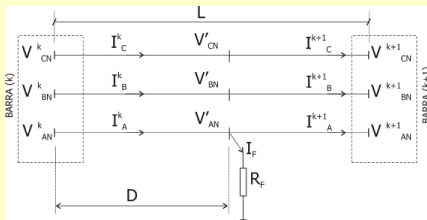
- A seguir é apresentado um exemplo de restauração de fornecimento de energia elétrica, após a ocorrência de um defeito.



# Sistemas de gerenciamento de interrupções

## Algoritmos para localização de faltas

- Senger, E.C.; Manassero, G., Jr.; Goldemberg, C.; Pellini, E.L.; ,  
“Automated fault location system for primary distribution networks”.  
Power Delivery, IEEE Transactions on, vol.20, no.2, pp. 1332- 1340,  
Abril 2005;
- A figura ilustra um curto-circuito fase-terra hipotético.



# Sistemas de gerenciamento de interrupções

## Algoritmos para localização de faltas

- Desconsiderando as capacitâncias da rede de distribuição:

$$\begin{bmatrix} V_{AN}^k \\ V_{BN}^k \\ V_{CN}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{AA} & z_{AB} & z_{AC} \\ z_{BA} & z_{BB} & z_{BC} \\ z_{CA} & z_{CB} & z_{CC} \end{bmatrix} \times D \times \begin{bmatrix} I_A^k \\ I_B^k \\ I_C^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{AN}' \\ V_{BN}' \\ V_{CN}' \end{bmatrix}$$

$$V_{AN}' = R_F \cdot I_F$$

$$I_F = I_A^k - I_A^{k+1}$$

$$V_{AN}^k = D \cdot \left[ (z_{AA} \cdot I_A^k) + (z_{AB} \cdot I_B^k) + (z_{AC} \cdot I_C^k) \right] + R_F \cdot I_F$$



# Aplicações de suporte à decisão

## Introdução

- Além das funções de localização de faltas, isolamento do trecho defeituoso e restauração da rede sã, existem outras ferramentas de apoio à decisão que podem ser empregadas de maneira independente, ou como suporte a essas funções:
  - Fluxo de carga;
  - Cálculo de curto-circuito;
  - Minimização das perdas técnicas;
  - Controle de reativos;
  - Controle do nível de tensão.

# Aplicações de suporte à decisão

## Fluxo de carga

- A ferramenta de cálculo de fluxo de carga normalmente é empregada para se verificar o carregamento da rede em condições normais de operação, para determinadas configurações;
- Essa ferramenta pode ser utilizada para o cálculo de perdas técnicas e para o cálculo da corrente de carga no caso de uma reconfiguração das redes de distribuição;
- Apesar de utilizar modelos matemáticos bastante precisos, depende da modelagem da carga, o que representa uma incerteza no cálculo.

# Aplicações de suporte à decisão

## Curto-circuito

- A ferramenta de cálculo de curto-circuito normalmente é empregada nas etapas de especificação e projeto das redes de distribuição, de modo a garantir que os sistemas de proteção sejam adequados;
- Porém, o uso dessa ferramenta é importante, mesmo após as etapas de especificação e projeto pois os sistemas interligados podem sofrer alterações, o que implica a mudança nas impedâncias equivalentes e nos níveis de curto-circuito.

# Aplicações de suporte à decisão

## Redução das perdas técnicas

- Empregadas na reconfiguração das redes de distribuição de modo a minimizar as perdas no transporte e transformação da energia:
  - Identificação das operações de chaveamento necessárias;
  - Realocações de carga entre alimentadores;
  - Verificação da operação dos sistemas dentro dos limites estabelecidos, quando da realocação de cargas.
- Vale ressaltar que essas operações dependem da topologia do sistema de distribuição (em sistemas com alta densidade de carga a possibilidade de realocações pode ser restrita e, em sistemas com baixa densidade de carga pode não haver alimentadores disponíveis).

# Aplicações de suporte à decisão

## Controle do fluxo de reativos

- Em redes radiais, o controle de reativos normalmente é feito com o uso de bancos de capacitores;
- Existem algoritmos para locação ótima desses capacitores na rede. Há métodos baseados em ferramentas de programação linear ou ferramentas de inteligência artificial;
- A função de controle de reativos normalmente decide a melhor estratégia para conexão/desconexão dos bancos de capacitores das redes.

# Aplicações de suporte à decisão

## Controle do nível de tensão

- O controle de tensão em redes de distribuição radial, normalmente é efetuado utilizando-se transformadores com tap variável ou reguladores de tensão;
- A função de controle de tensão atua ajustando o tap desses transformadores ou efetuando a conexão/desconexão dos reguladores de tensão nas redes.

# Aplicações de suporte à decisão

## Qualidade dos dados

- A validade dos resultados apresentados pelas aplicações de suporte à decisão e das ferramentas de gerenciamento de interrupções depende da disponibilidade de dados e da sua qualidade. Os dados normalmente empregados por essas ferramentas são:
  - Topologia: sistema de coordenadas georreferenciadas, normalmente com o uso das coordenadas UTM;
  - Conectividade das redes e estado das chaves e disjuntores: descrição do tipo “pai-filho” dos nós da rede, com detalhes sobre o estado das chaves e disjuntores;
  - Parâmetros elétricos: geometria das torres/postes, dados sobre os condutores, transformadores, reatores, capacitores, etc.);
  - Cargas: localização e comportamento, que pode ser obtido pelo agrupamento de curvas típicas de consumidores.

# Aplicações de suporte à decisão

## Qualidade dos dados

<b>Aplicação</b>	<b>Topologia</b>	<b>Parâmetros elétricos</b>
IHM	X	
Gerenciamento de chaveamentos	X	X
Gerenciamento de interrupções	X	X
Fluxo de carga		X
Curto-circuito		X
Controle de tensão e de reativos		X



# Subsistemas

## Automação das subestações

- Sistemas de automação tradicionais obtém os dados de equipamentos instalados nas subestações;
- Esses sistemas fazem o uso de RTU's que registram dados fornecidos por relés de proteção e equipamentos das subestações;
- As RTU's se comunicam com os centros de operação a partir de *gateways*;
- Essa solução não acompanhou a evolução dos relés de proteção e, portanto, é restritiva e eventualmente apresenta custo elevado.

# Subsistemas

## Automação das subestações

- A utilização de relés de proteção modernos (IED's), permite a implementação de sistemas de automação e controle em níveis distintos das subestações. São eles:
- Processo: tipicamente são os equipamentos que estão conectados diretamente ao sistema de potência, bem como entradas e saídas dos IED's, sensores, atuadores, etc.;
- *Bay* (ou vão): são as unidades de controle, automação e proteção dos *bays* das subestações;
- Estação: consiste nos computadores dos operadores, nas interfaces para comunicação remota, nas bases de dados do sistema, porém no ambiente da subestação.

# Subsistemas

## Automação das subestações

- Algumas arquiteturas típicas para a automação de subestações são:
  - Tradicionais: arquiteturas baseadas em RTU's, que evoluíram a partir dos sistemas SCADA convencionais, incorporando as capacidades de processamento dos modernos IED's por meio de canais de comunicação;
  - Proprietárias: arquiteturas modulares, distribuídas e completamente funcionais;
  - PC/PLC: arquiteturas baseadas em PC's, onde é instalada a IHM, e PLC's empregados na substituição de sistemas eletromecânicos convencionais para alarme, bloqueio, temporizações, etc.;
  - *Black box*: arquiteturas baseadas em PC's, onde são implantadas todas as funções de automação, proteção e controle.

# Subsistemas

## Automação das subestações

<b>Características</b>	<b>Tradicionais</b>	<b>Proprietárias</b>	<b>PC/PLC</b>	<b>Black box</b>
<b>HMI</b>	Limitadas	Proprietárias	Diversas	Proprietárias
<b>Sistema Operacional</b>	Windows DOS	Proprietários	Windows DOS	Proprietários
<b>Protocolo de rede</b>	ModBus DNP3.0, etc.	Proprietários	Baseado nos PLC's	Proprietários
<b>Comunicação com os IED's</b>	Conversão de protocolos	Proprietárias	Conversão de protocolos	Proprietárias

# Subsistemas

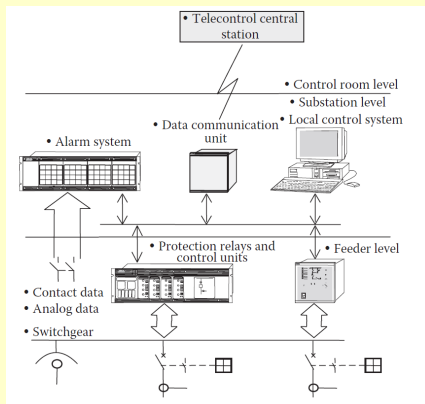
## Automação local das subestações

- A arquitetura utilizada atualmente consiste em equipamentos de proteção e controle independentes para cada *bay*;
- Esses equipamentos compartilham um sistema de comunicação e fornecem informações aos sistemas de automação local e telecontrole;
- Tecnicamente é possível integrar diversas funções em apenas um equipamento (o IED de proteção, p. e.x.), porém a medição para efeito de tarifação deve ser efetuada em equipamentos conectados a TC's de medição.

# Subsistemas

## Automação local das subestações

- A arquitetura empregada atualmente está ilustrada a seguir.



# Subsistemas

## Automação local das subestações

- Os equipamentos de proteção e controle são capazes de fornecer as seguintes informações:
  - Histórico de eventos;
  - Oscilografias;
  - Estado dos disjuntores e seccionadoras;
  - Ajustes e parâmetros, etc.
- Por sua vez, os sistemas de automação local e telecontrole podem enviar:
  - Comandos de controle;
  - Ajustes e parâmetros;
  - Mensagens de sincronismo de tempo (SNTP ou PTP).

# Automação dos alimentadores de distribuição

## Conceitos gerais

- Refere-se à automação e ao controle dos equipamentos instalados nos alimentadores, que se encontram fora do ambiente da subestação.

Consiste em:

- Seccionadoras: controle de abertura/fechamento e sinalização de estado;
  - Reguladores de tensão: sinalização de estado e, eventualmente, estratégia de controle do regulador;
  - Capacitores: sinalização de estado e, eventualmente, estratégia de controle do capacitor;
  - Equipamentos de medição: medição remota de consumo de energia elétrica.
- De um modo geral, a automação e o controle dos alimentadores é bastante incipiente e depende da arquitetura do sistema de comunicação.



# Bases de dados e interfaces

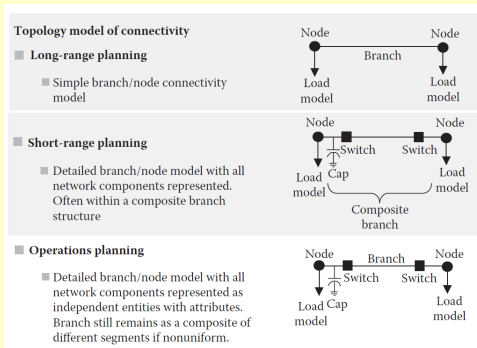
## Introdução

- Os sistemas de gerenciamento da distribuição utilizam dados referentes aos equipamentos que integram as redes elétricas de distribuição, bem como os consumidores/cargas dessas redes;
- Usualmente, esses dados são armazenados em bases de dados específicas. Porém as tarefas de projeto, população e manutenção dessas bases de dados é bastante complexa;
  - Projeto: consiste na modelagem dos componentes das redes elétricas de modo a descrevê-los com as informações suficientes para todos os sistemas da empresa;
  - População: demanda trabalho de campo e integração com outras fontes de dados já existentes;
  - Manutenção: exige regras e procedimentos capazes de garantir a integridade e qualidade dos dados.

# Bases de dados e interfaces

## Níveis de informação

- As bases de dados devem atender aos níveis de informação utilizados pelos sistemas da empresa.



# Bases de dados e interfaces

## Representação dos dados dos sistemas

- Tradicionalmente, as bases de dados foram desenvolvidas pelas concessionárias de energia elétrica, para atender às suas necessidades particulares;
- Essas bases apresentam os modelos escolhidos para a representação dos diversos componentes das redes elétricas;
- Não há uniformidade nos dados e, além disso, não há uniformidade na representação dos dados;
- O TC57 (*Technical Committee 57*) da IEC (*International Electrotechnical Commission*) desenvolveu um modelo de dados denominado CIM – *Common Information Model*.

# Bases de dados e interfaces

## *Common information model*

- O CIM foi definido a partir de técnicas de modelagem orientadas a objetos;
- A especificação do CIM utiliza a notação UML (*Unified Modeling Language*), que define o CIM como um grupo de pacotes;
- Cada grupo de pacotes contém as informações sobre suas classes (atributos e relacionamentos com outras classes);
- Os pacotes são: Condutores; SCADA; Modelos de cargas; Transações de energia; Geração; Cobrança e liquidação; e Domínio.