

# ET720 – Sistemas de Energia Elétrica I

## Capítulo 1 – Introdução

Carlos A. Castro

DSE/FEEC/UNICAMP

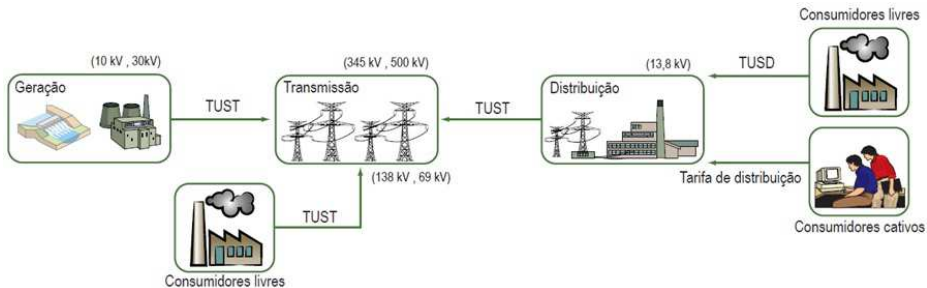
## 1. Sistemas de potência e seu impacto na sociedade

“Um sistema elétrico de potência é o conjunto de circuitos elétricos inter-relacionados, que compreende a instalação para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica até a medição inclusive.” (ABNT)

ou

“Um sistema de potência corresponde a um conjunto de equipamentos que operam de maneira coordenada de forma a gerar, transmitir e fornecer energia elétrica aos consumidores no momento em que esta for solicitada, mantendo o melhor padrão de qualidade possível.”

## 1. Sistemas de potência e seu impacto na sociedade



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil: 3a. Edição, ANEEL, 2008.

“The North American interconnected power system is the largest and most complex machine ever devised by man.”

Autor da frase: Charles [Steinmetz](#)<sup>1</sup>, que morreu em 1923!

---

<sup>1</sup>Charles Steinmetz (1865-1923), engenheiro eletricista, desenvolveu ferramentas de análise matemática para o estudo de circuitos de corrente alternada, através da utilização de números complexos.

“It is truly amazing that such a system has operated with a high degree of reliability for over a century.”

Autor da frase: Neil J. Balu <sup>2</sup>, no prefácio do livro Prabha Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.

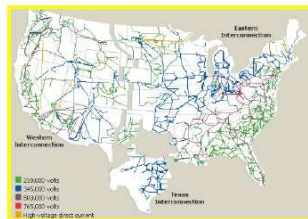
---

<sup>2</sup>Program manager, Power System Planning and Operation, Electrical Systems Division, Electric Power Research Institute (EPRI).

## 1. Sistemas de potência e seu impacto na sociedade



**Fred C. Scheweppe (1934-1988)**  
**Professor of Electrical Engineering, MIT**



**US Power grid**

“I worked on aerospace problems for many years before converting to power systems, and, in my opinion at least, power problems are tougher in many respects.

...

The number of variables [in a power system] is huge, and many types of uncertainties are present.

...

Few if any aerospace problems yield such a challenging set of conditions.”

– Fred. C. Scheweppe, 1970

- Requisitos de um Sistema Elétrico de Potência:
  - **Disponibilidade** – a energia elétrica deve estar sempre disponível ao consumidor
  - **Continuidade** – o serviço não deve sofrer interrupções, ou, na prática, o serviço deve sofrer o mínimo número de interrupções, e estas devem durar o menor tempo possível
  - **Conformidade** – fornecimento de energia deve obedecer a padrões (a forma de onda da tensão deve ser [a mais próxima possível de] uma senoide), os níveis de tensão devem estar dentro de uma faixa especificada, a frequência deve estar dentro de uma faixa especificada)

- Requisitos de um Sistema Elétrico de Potência (continuação):
  - **Flexibilidade** – adaptação as mudanças contínuas de topologia
  - **Segurança** – fornecimento de energia elétrica não deve causar riscos aos consumidores
  - **Modicidade** – a energia deve ser entregue ao consumidor com o mínimo custo (geração econômica, transmissão com mínima perda, etc)
  - **Sustentabilidade** – o impacto ambiental do serviço deve ser mínimo (emissão de NO<sub>x</sub>, desmatamento, etc)



## 1. Sistemas de potência e seu impacto na sociedade

“Electricity is a very effective form of energy. It can be produced by a variety of methods, moved quite efficiently and safely, and fashioned into light, heat, power, or electronic activity with ease. Without it, neither the industrial nor the cultural levels achieved by the human race would be possible. Over eighty percent of the people on this planet have access to the personal use of electric power on a daily basis.”

L. Philipson, H.L. Willis, Understanding electric utilities and de-regulation, Marcel Dekker, 1999.

## 1. Sistemas de potência e seu impacto na sociedade

02/05/2018 13h50

Paula Fernández

Lisboa, 2 mai (EFE).- Um bilhão de pessoas no mundo ainda não têm acesso à eletricidade e espera-se que 674 milhões não contem com ela em 2030, ano no qual 21% do consumo energético mundial procederá de energias renováveis, de acordo com as conclusões do Relatório sobre o Progresso Enérgico elaborado pela Agência Internacional da Energia (AIE) e do Banco Mundial (BM), entre outras entidades, e apresentado nesta quarta-feira em Lisboa.

O relatório mostra que os números ainda estão longe de atingir o objetivo de desenvolvimento sustentado da ONU para 2030.

Fonte: [economia.uol.com.br](http://economia.uol.com.br).

## 1. Sistemas de potência e seu impacto na sociedade

- Em 1882, Thomas Alva Edison coloca em funcionamento o **primeiro sistema de potência** (geração + transmissão + distribuição)

Isso ocorreu em New York, na Pearl Street Station. Geradores c.c. (chamados dínamos na época) acionados por motores a explosão forneciam 30 kW em 110 V a 59 consumidores (somente iluminação incandescente) numa área de 1 milha quadrada

- A partir daí, e também contando com a introdução do fornecimento de energia elétrica em corrente alternada, os **sistemas de potência evoluíram** meteoricamente

## 1. Sistemas de potência e seu impacto na sociedade

- A **flexibilidade, eficiência e confiabilidade** do serviço de fornecimento de energia elétrica foram fatores determinantes no processo
- Chegou-se a um ponto em que a **sociedade** tornou-se altamente **dependente da eletricidade**. É difícil imaginar a sociedade moderna sem eletricidade:
  - Qualidade de vida e desenvolvimento econômico
  - Forma dominante de energia para produção de bens e serviços, telecomunicações e tecnologia da informação

## 1. Sistemas de potência e seu impacto na sociedade

- A qualidade do serviço é que a fez tornar-se invisível para os consumidores
- Hoje em dia fica mais difícil avaliar a afirmação de Steinmetz, pois há que se fazer uma comparação com a World Wide Web, redes de comunicação, etc

E mais, hoje todas essas tecnologias atuam de forma integrada!

- Alguns fatos são inquestionáveis:

- Sem energia elétrica não há WWW
- Sem energia elétrica não há um sistema de comunicações
- Hoje em dia utiliza-se a WWW no setor elétrico de forma intensiva
- Hoje em dia utiliza-se a tecnologia de comunicações no setor elétrico de forma intensiva



Portanto, (SEP + WWW + comunicações) formam, sem dúvida, a maior e mais complexa máquina já criada pelo homem, eu acho . . .

## 1. Sistemas de potência e seu impacto na sociedade

- Há os desenvolvimentos próprios da área, como por exemplo:
  - desenvolvimento de novos equipamentos mais eficientes e robustos
  - desenvolvimento de métodos de análise mais sofisticados e eficientes
  - pesquisa de novos materiais (estudos da supercondutividade a altas temperaturas), etc

e também ...

...a utilização frequente de **tecnologias de outras áreas** a fim de melhorar a qualidade dos serviços, como por exemplo:

- **computação paralela**
- técnicas de **inteligência artificial**: sistemas especialistas, redes neurais artificiais, lógica nebulosa, etc
- **algoritmos evolutivos**: algoritmos genéticos, etc
- técnicas avançadas de **telecomunicações** (por exemplo GPS – Global Positioning System)
- **eletrônica de potência** (por exemplo os dispositivos FACTS – Flexible AC Transmission Systems)



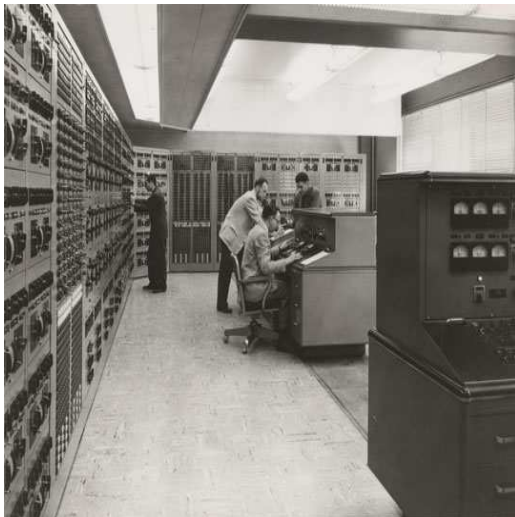
- Antes dos computadores digitais: **network analyzers**<sup>3</sup>
  - usavam circuitos RLC e fontes para emular o sistema elétrico
  - podiam ocupar várias salas, no caso de sistemas de grande porte
  - consumiam muita energia
  - a implementação de modificações na rede era muito trabalhosa, implicando em alterar a fiação e reajustar os elementos do circuito

---

<sup>3</sup>Ver [http://en.wikipedia.org/wiki/Network\\_analyzer\\_\(AC\\_power\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Network_analyzer_(AC_power))

## 1. Sistemas de potência e seu impacto na sociedade





Fonte: <http://www2.cit.cornell.edu/computer/history/Linke.html>

Network analyzer da marca Westinghouse instalado na EE School, Cornell University, 1955

## 1. Sistemas de potência e seu impacto na sociedade

- Após os computadores digitais:
  - as **empresas de energia elétrica** foram, de longe, as maiores **usuárias** de computadores digitais e uma grande parcela de seu desenvolvimento deve-se a elas
  - empresas de energia elétrica **investiram** muitos milhões de dólares no desenvolvimento de *hardware* e *software*
- Network analyzers foram utilizados antes e também algum tempo depois da utilização de computadores digitais

## 2. O setor elétrico: velhos e novos tempos

- Desde o final do século XIX, até o final do século XX, o setor elétrico operou de forma **regulada** – empresas detinham o monopólio local  
O consumidor tinha que comprar energia da empresa local
- Empresas costumavam ter uma organização **vertical** – realizavam todas as funções: geração, transmissão, distribuição e comercialização
- Anos 80: sentimento de que a competição poderia ser uma melhor maneira de encorajar novos investimentos no planejamento e operação do sistema elétrico  
⇒ **desregulamentação**

## 2. O setor elétrico: velhos e novos tempos

- Alguns conceitos tornaram-se importantes no início de uma nova fase do setor elétrico:
  - **Competição**: duas ou mais entidades disputam oportunidades de negócios. A competição ocorre em dois níveis:
    - Geração (wholesale): diferentes empresas possuem geração e competem pela venda de blocos de energia
    - Comercialização (retail): consumidores poderiam ter a oportunidade de escolher os seus fornecedores de energia dentre as ofertas feitas localmente,



ou seja ...

## 2. O setor elétrico: velhos e novos tempos

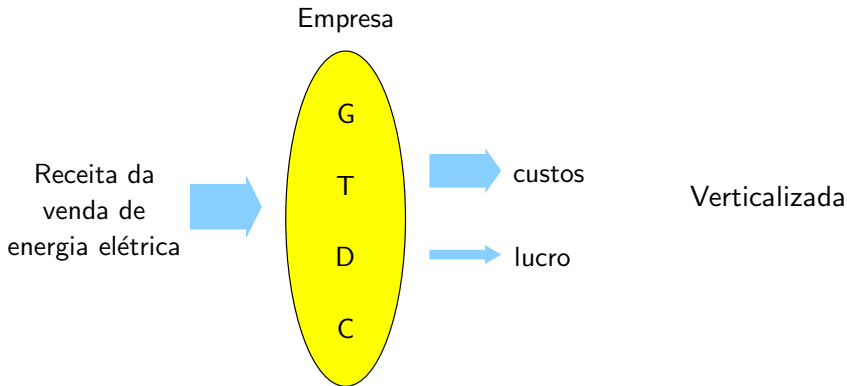


## 2. O setor elétrico: velhos e novos tempos

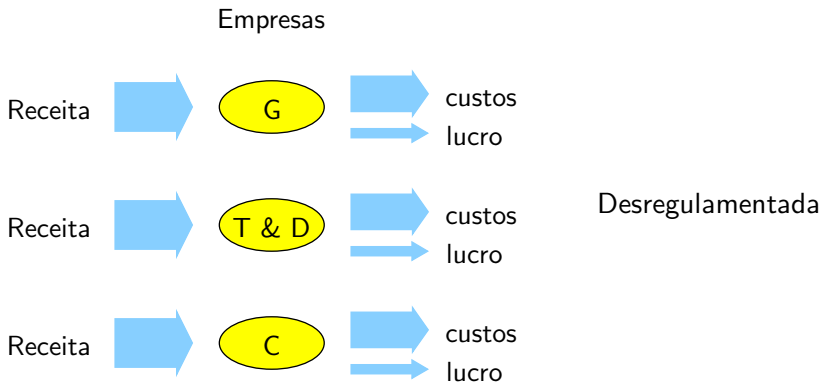
- **Desregulamentação:** mudança das regras que definem a operação das empresas, com o objetivo de encorajar a competição. Inclui mudanças no monopólio e outras regras que definem os negócios das empresas, e nas regras de compra de energia por parte dos consumidores. (seria re-regulamentação?)
- **Reestruturação:** “desmontar” as empresas e “remontá-las” segundo um novo conceito organizacional
- **Privatização:** empresas estatais são vendidas a entidades privadas. A reestruturação deve ser feita cuidadosamente para atrair mais potenciais investidores no processo de privatização
- **Open access:** A rede de transmissão é vista como o meio de ligação entre geradores a consumidores. Ambos pagam pelo seu uso



- Estrutura verticalizada  $\times$  estrutura desregulamentada



## 2. O setor elétrico: velhos e novos tempos



- Características da estrutura regulada:
  - Monopólio (franchise) – somente a empresa local pode comercializar energia elétrica no seu território determinado
  - Obrigação de servir – a empresa local deve fornecer energia elétrica a todos os consumidores do seu território
  - Regulação supervisionada – todas as práticas operacionais e comerciais da empresa devem atender regulamentação definida pelas agências governamentais
  - Operação de mínimo custo – a empresa deve operar de forma a minimizar seus requisitos de receita
  - Tarifas reguladas – as tarifas cobradas pelas empresas são definidas de acordo com regulamentação definida pelas agências governamentais
  - Taxa de retorno assegurada – assegura-se à empresa um retorno “justo” de seus investimentos, se estes estiverem de acordo com a regulamentação

- Benefícios da regulamentação:
  - Legitimou a estrutura do setor elétrico – o monopólio e a regulação implicaram na ideia de que o oferecimento do serviço era fundamental para a sociedade, e que o governo cuidava disso
  - As empresas tinham o reconhecimento e apoio dos governos
  - O retorno dos investimentos eram garantidos
  - Estabeleceu o monopólio local – as empresas podiam focar seus esforços em desenvolver seus sistemas e melhorar a qualidade do fornecimento, sem preocupações relativas a competição, manutenção e expansão do seu mercado, etc.

## 2. O setor elétrico: velhos e novos tempos

- Resumindo: a regulação ofereceu uma maneira aceitável e livre de riscos para o financiamento da criação do setor elétrico:

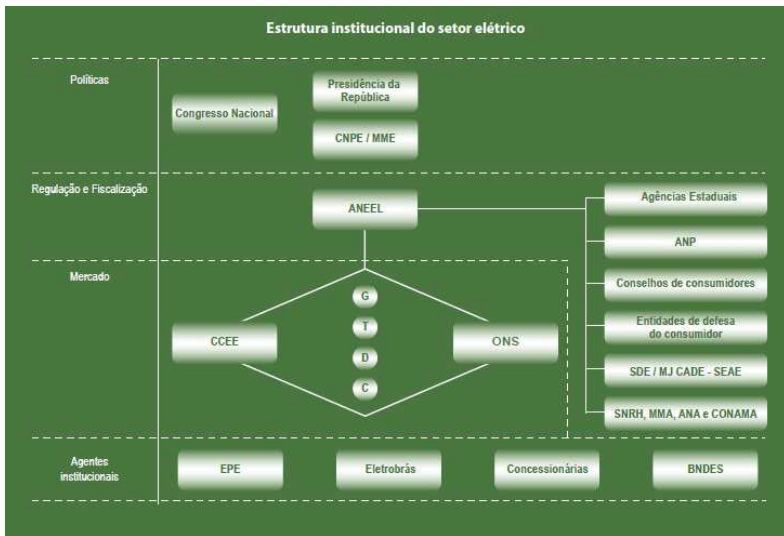
“Without utility regulation and government sponsorship or backing of electric utilities, a universal electric system, reaching all homes and businesses, and the infrastructure to support it, would never have been built.” <sup>a</sup>

---

<sup>a</sup>L. Philipson, H.L. Willis, Understanding electric utilities and de-regulation, Marcel Dekker, 1999.

- Justificativas para a desregulamentação:
  - Regulação não é mais necessária – a objetivo original e fundamental para a regulação, ou seja, incentivar o desenvolvimento de uma infraestrutura forte para o sistema elétrico, já foi atingido
  - Preços da energia podem cair – os preços devem cair devido a inovações e competição
  - Foco no consumidor – espera-se que a competição resulte em maior poder de escolha para o consumidor e maior atenção à melhoria do serviço oferecido
  - Incentivo à inovação – um setor elétrico competitivo poderá resultar em recompensas àqueles que assumirem os riscos e usarem novas tecnologias e abordagens comerciais
  - Aumento da privatização – a desregulamentação pode aumentar o valor dos ativos das empresas estatais, tornando-as mais atraentes para potenciais investidores

### 3. Estrutura do setor elétrico brasileiro



- Entidades e suas funções<sup>4</sup>:

- Ministério de Minas e Energia – MME – encarregado de formulação, do planejamento e da implementação de ações do Governo Federal no âmbito da política energética nacional. O MME detém o poder concedente.
- Conselho Nacional de Política Energética – CNPE – órgão de assessoramento do Presidente da República para formulação de políticas nacionais e diretrizes de energia, visando, dentre outros, o aproveitamento natural dos recursos energéticos do país, a revisão periódica da matriz energética e a definição de diretrizes para programas específicos.
- Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico – CMSE – constituído no âmbito do MME e sob sua coordenação direta, com a função precípua de acompanhar e avaliar permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento eletroenergético em todo o território.

---

<sup>4</sup>Fonte: [http://www.dee.ufc.br/~rleao/GTD/I\\_Introducao.pdf](http://www.dee.ufc.br/~rleao/GTD/I_Introducao.pdf)



- Entidades e suas funções (cont.):
  - Empresa de Pesquisa Energética – EPE – empresa pública federal vinculada ao MME tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinados a subsidiar o planejamento do setor energético.
  - Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL – autarquia vinculada ao MME, com finalidade de regular a fiscalização, a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia, em conformidade com as políticas e diretrizes do Governo Federal. A ANEEL detém os poderes regulador e fiscalizador.

- Entidades e suas funções (cont.):

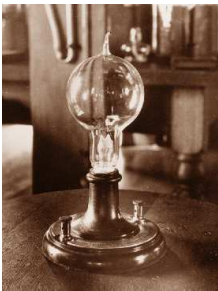
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS – pessoa jurídica de direito privado, sem fins lucrativos, sob regulação e fiscalização da ANEEL, tem por objetivo executar as atividades de coordenação e controle da operação de geração e transmissão, no âmbito do SIN (Sistema Interligado Nacional). O ONS é responsável pela operação física do sistema e pelo despacho energético centralizado.
- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE – pessoa jurídica de direito privado, sem fins lucrativos, sob regulação e fiscalização da ANEEL, com finalidade de viabilizar a comercialização de energia elétrica no SIN. Administra os contratos de compra e venda de energia elétrica, sua contabilização e liquidação. A CCEE é responsável pela operação comercial do sistema.

- A comercialização de energia elétrica é realizada em dois ambientes diferentes:
  - Ambiente de Contratação Livre (ACL) – destinado ao atendimento de consumidores livres<sup>5</sup> por meio de contratos bilaterais firmados com produtores independentes de energia, agentes comercializadores ou geradores estatais. Estes últimos só podem fazer suas ofertas por meio de leilões públicos.
  - Ambiente de Contratação Regulada (ACR) – destinado ao atendimento de consumidores cativos por meio das distribuidoras, sendo estas supridas por geradores estatais ou independentes que vendem energia em leilões públicos anuais.

---

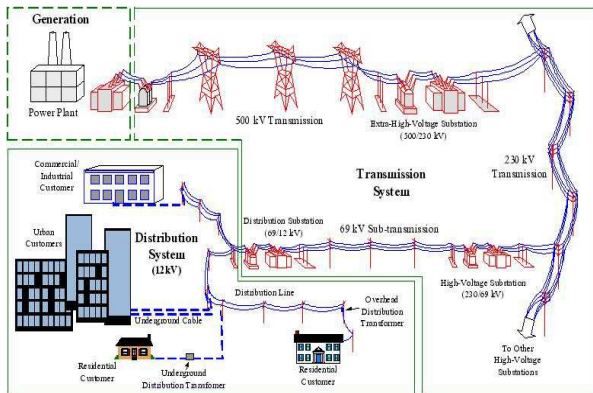
<sup>5</sup>Consumidor livre – consumidor que pode optar pela compra de energia elétrica junto a qualquer fornecedor, que é atendido em qualquer tensão e com demanda contratada mínima de 3 MW. (Resolução ANEEL No. 264 e 456).

### 3. Estrutura do setor elétrico brasileiro



#### 4. Sistemas de energia elétrica (SEE)

- Sistema de energia elétrica (SEE)



- Equipamentos – geradores, transformadores, linhas de transmissão, disjuntores, pára-raios, relés, medidores etc.

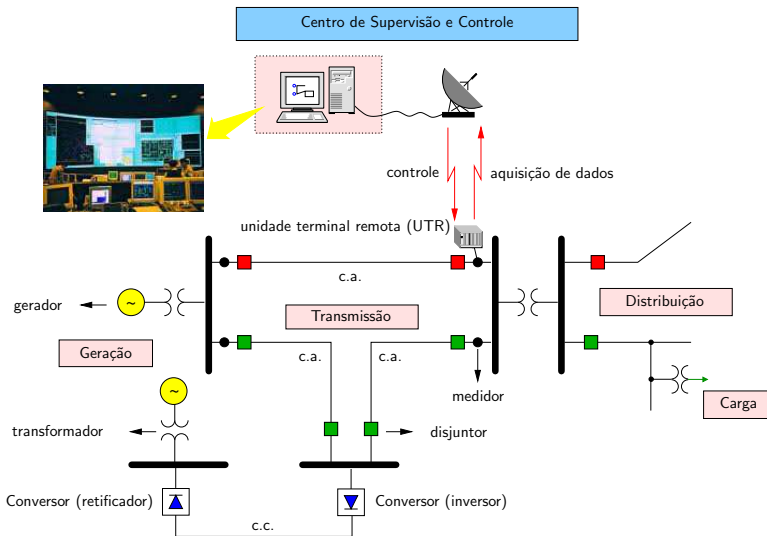
- Padrão de qualidade – existem alguns requisitos básicos a serem satisfeitos pelas empresas concessionárias de energia elétrica com relação ao fornecimento aos consumidores:
  - os níveis de tensão devem estar dentro de uma faixa especificada;
  - a frequência deve estar dentro de uma faixa especificada;
  - o serviço não deve sofrer interrupções (na prática: o serviço deve sofrer o mínimo número de interrupções, e estas devem durar o menor tempo possível);
  - a forma de onda da tensão deve ser (a mais próxima possível de) uma senóide;
  - a energia deve ser entregue ao consumidor com o mínimo custo (geração econômica, transmissão com mínima perda, etc.);
  - o impacto ambiental deve ser mínimo (emissão de  $\text{NO}_x$ , etc.);
  - outros ...

#### 4. Sistemas de energia elétrica (SEE)

- SEE é um  $\left\{ \begin{array}{ll} \text{circuito elétrico} & - \text{ leis de Kirchhoff} \\ \text{sistema de controle} & - \text{ operação otimizada} \end{array} \right.$

## 4. Sistemas de energia elétrica (SEE)

### • SEE típico:





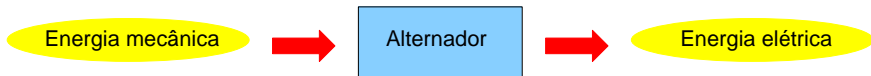
- Ideia desta disciplina: estudar os principais componentes dos SEE típicos e obter seus respectivos modelos

Tais modelos colocados juntos formam um circuito elétrico que deve ser resolvido (cálculo de tensões nos nós, fluxos de corrente e/ou potência nos ramos)

Serão estudados também métodos de resolução desses circuitos

## 5. Sistema de geração

- Gerador, transformador elevador (e ainda barragens, caldeiras, turbinas etc.).
- Conversão convencional:



Fontes primárias:    hidráulica  
                              combustível fóssil: carvão, petróleo, gás  
                              fissão nuclear

- Conversão não convencional:

Solar: células fotoelétricas → rendimento baixo, alto custo

Eólica: cataventos → EUA (Califórnia), Dinamarca, Brasil e outros  
→ *windmill farms*) → níveis de penetração crescentes

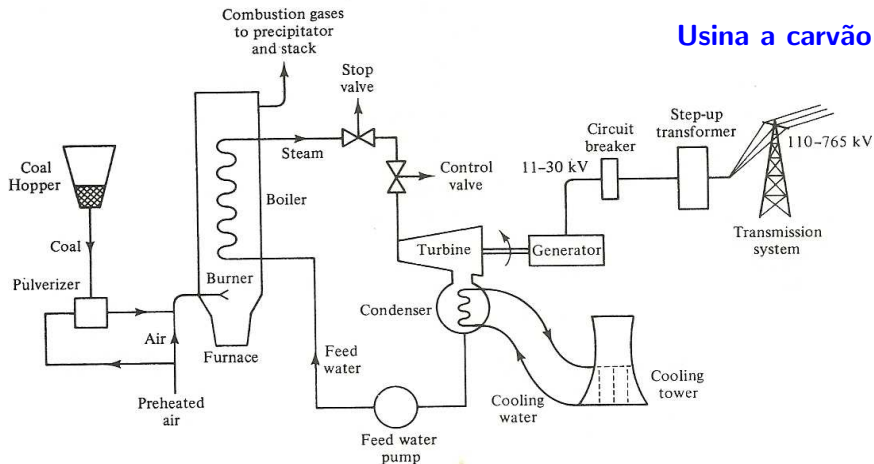
Biomassa: Brasil → níveis de penetração crescentes

- Ver também:

- Material do professor Walmir – slides 47 a 52
- Matéria sobre PV

## 5. Sistema de geração

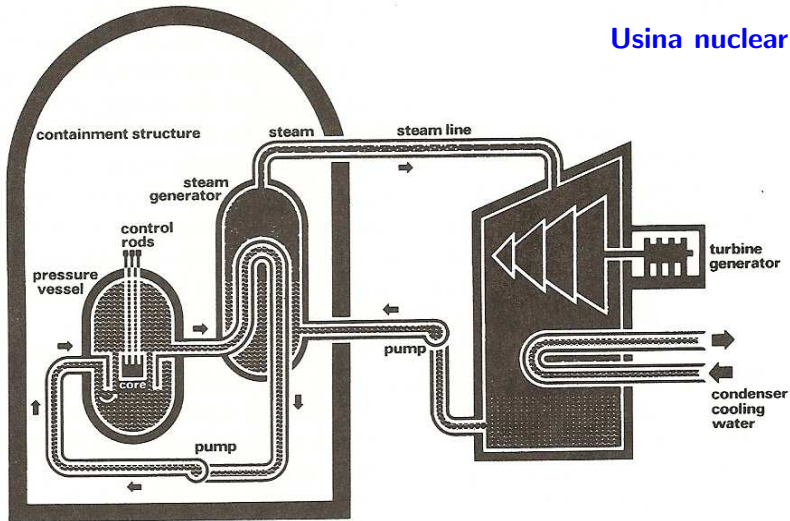
### Usina a carvão



A.R. Bergen, V. Vittal, Power Systems Analysis, 2nd Edition, Prentice Hall, 2000

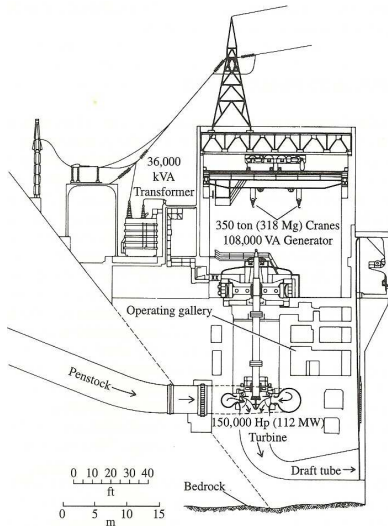
## 5. Sistema de geração

### Usina nuclear



A.R. Bergen, V. Vittal, Power Systems Analysis, 2nd Edition, Prentice Hall, 2000

## Usina hidrelétrica



A.R. Bergen, V. Vittal, Power Systems Analysis, 2nd Edition, Prentice Hall, 2000

- Geração:

O potencial hidráulico do País é de 260 GW, dos quais em torno de 28% estão sendo utilizados na produção de energia pelas usinas hidrelétricas de médio e grande porte e as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's)

A Região Norte tem o maior potencial para geração hidráulica, 114 GW ou 44%, enquanto a Região Nordeste tem apenas 10% deste total, 26 GW

- Geração (cont.):

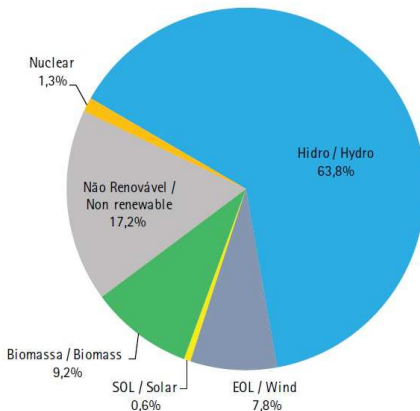
Ao final de 2008, a capacidade de geração instalada no SIN alcançou 89.000 MW, sendo 74.000 MW em usinas hidrelétricas (incluindo 7.000 MW de Itaipu) e 14.000 MW em usinas térmicas (incluindo 2.000 MW das usinas nucleares)

Para se obter a capacidade de produção total disponível, deve-se somar a esses valores a disponibilidade de importação de 2.178 MW da Argentina e 6.000 MW de Itaipu, parte contratada à ANDE/Paraguai



## 5. Sistema de geração

Gráfico 1.1.4 Participação das fontes na capacidade instalada  
Chart 1.1.4 Participation of Energy Sources in the Installed Capacity

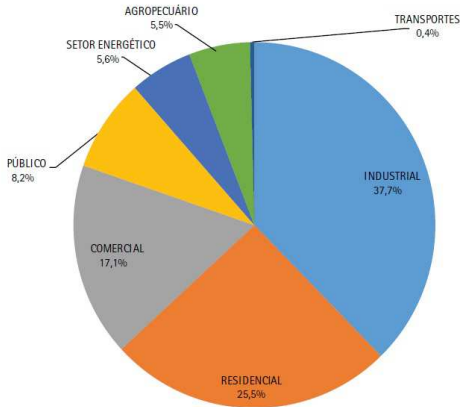


Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017, Rio de Janeiro, 2017.

## 5. Sistema de geração

Gráfico 1.1.3 - Participação setorial no consumo de eletricidade

Chart 1.1.3 - Electricity consumption share by sector



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017, Rio de Janeiro, 2017.

- Complementos:
  - Material do professor Walmir – slides 13 a 22
  - Material do professor Walmir
  - Material do professor Walmir

## 6. Sistema de transmissão

- Linhas de transmissão, transformadores de regulação e acessórios
- Uma divisão típica é:



## 6. Sistema de transmissão

### EXTENSÃO DA REDE DE TRANSMISSÃO

800 kV CC	2017 4.600 km	2023 9.636 km
750 kV	2017 2.683 km	2023 2.683 km
600 kV CC	2017 12.816 km	2023 12.816 km
500 kV	2017 47.750 km	2023 71.891 km
440 kV	2017 6.748 km	2023 6.969 km
345 kV	2017 10.320 km	2023 11.492 km
230 kV	2017 58.471 km	2023 83.997 km
<b>TOTAL</b>	<b>141.388 km</b>	<b>185.484 km</b>

Fonte: 2017 - Dados Relevantes da Operação / 2023 - PAR

- Complemento: **Material do professor Walmir – slides 23 a 30**

## 7. Sistema de distribuição

- Linhas de distribuição primárias e secundárias, transformadores abaixadores e cargas



“... the distribution system has traditionally been characterized as the most unglamorous component. In the last half of the twentieth century, the design and operation of the generation and transmission components presented many challenges to the practicing engineer and researchers. Power plants became larger and larger and the transmission lines crisscrossed the land forming large interconnected networks. The operation of the large interconnected networks required the development of new analysis and operational techniques. Meanwhile, the distribution systems continued to deliver power to the ultimate user's meter with little or no analysis. As a direct result, distribution systems were typically overdesigned.”



“Times have changed and it has become very important and necessary to operate a distribution system at its maximum capacity. Some of the questions that need to be answered are:

- What is the maximum capacity?
- How do we determine this capacity?
- What are the operating limits that must be satisfied?
- What can be done to operate the distribution system within the operating limits?
- What can be done to make the distribution system operate more efficiently?”

“All of these questions can be answered only if the distribution system can be modeled very accurately.”

Fonte: W.H. Kersting, Distribution system modeling and analysis, CRC Press, 2007.

- Estas respostas têm sido dadas rapidamente nos últimos anos . . .

- Distribuição:

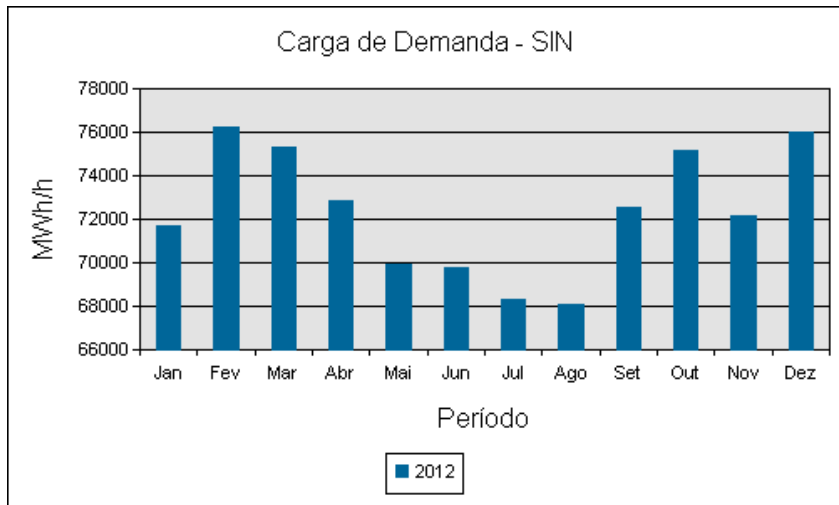
O mercado de distribuição de energia elétrica é atendido por 64 concessionárias, estatais (20%) ou privadas (80%), de serviços públicos que abrangem todo o país

As concessionárias estatais estão sob controle dos governos federal, estaduais e municipais

Em várias concessionárias privadas verifica-se a presença, em seus grupos de controle, de diversas empresas nacionais, norte-americanas, espanholas e portuguesas

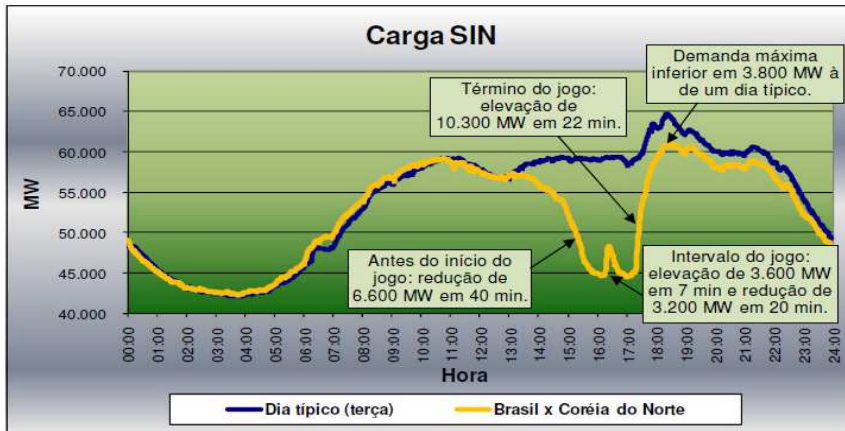
São atendidos cerca de 47 milhões de unidades consumidoras, das quais 85% são consumidores residenciais, em mais de 99% dos municípios brasileiros

## 7. Sistema de distribuição



Fonte: [www.ons.com.br](http://www.ons.com.br)

## 7. Sistema de distribuição

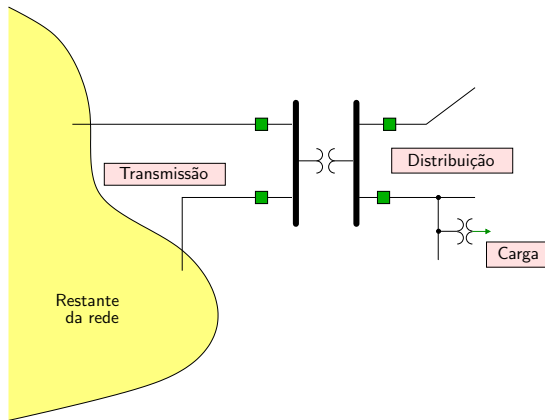


Veja mais [aqui](#)

- Complemento: **Material do professor Walmir – slides 31 a 43**

## 7. Sistema de distribuição

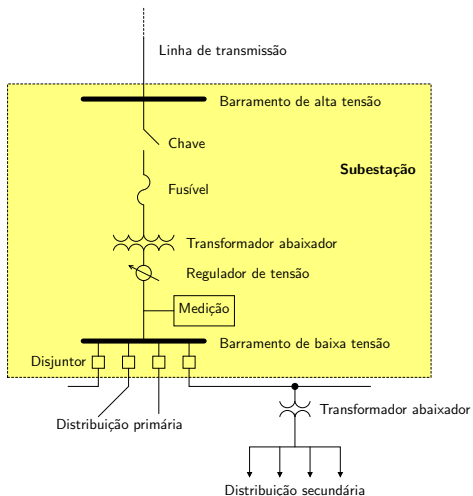
- Da figura mostrada anteriormente pode-se extrair:



e a estrutura dos sistemas de distribuição pode ser um pouco mais detalhada

## 7. Sistema de distribuição

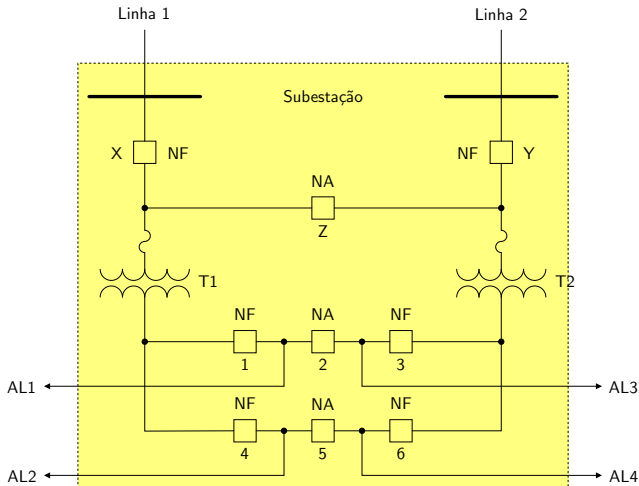
- Um sistema de distribuição simples é:



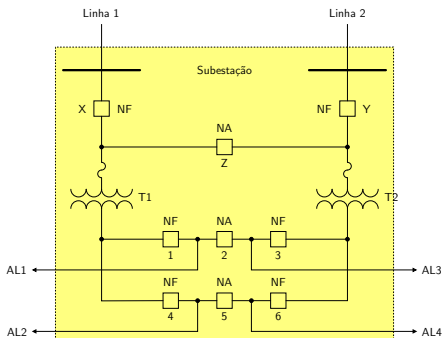


## 7. Sistema de distribuição

- Uma configuração mais elaborada da subestação é (configuração de um disjuntor e meio – três disjuntores para dois alimentadores):



## 7. Sistema de distribuição

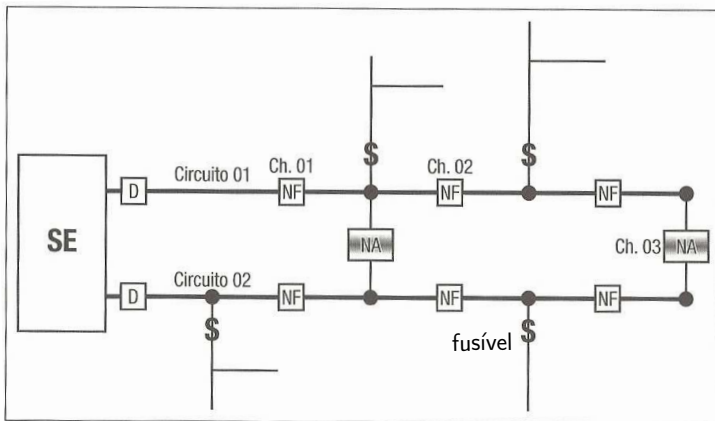


- Se a linha 2 sai de operação, disjuntor X abre e disjuntor Z fecha
- Se T1 sai de operação, disjuntores X, 1 e 4 abrem, e 2 e 5 fecham. Cada transformador deve ser projetado de forma a poder alimentar os quatro alimentadores

- Há muitas configurações de subestações possíveis, desde que as seguintes funções básicas sejam satisfeitas:
  - a configuração deve representar um bom balanço entre a confiabilidade e custo
  - possibilidades de chaveamento nos lados de alta e baixa tensões
  - transformação de tensão
  - regulação de tensão (através de reguladores de tensão ou transformadores com tap variável)
  - proteção
  - possibilidade de manobras
  - medição (analógica ou digital)

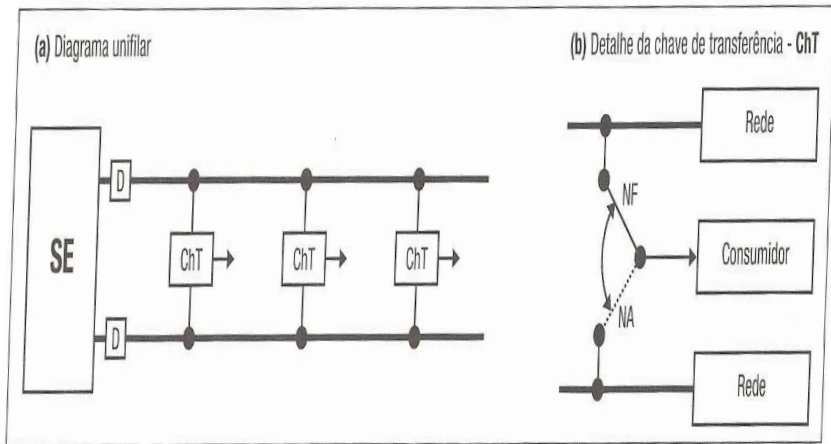
## 7. Sistema de distribuição

- Topologias da rede primária (ordem crescente de custo)
- Primário radial – aéreo, típico



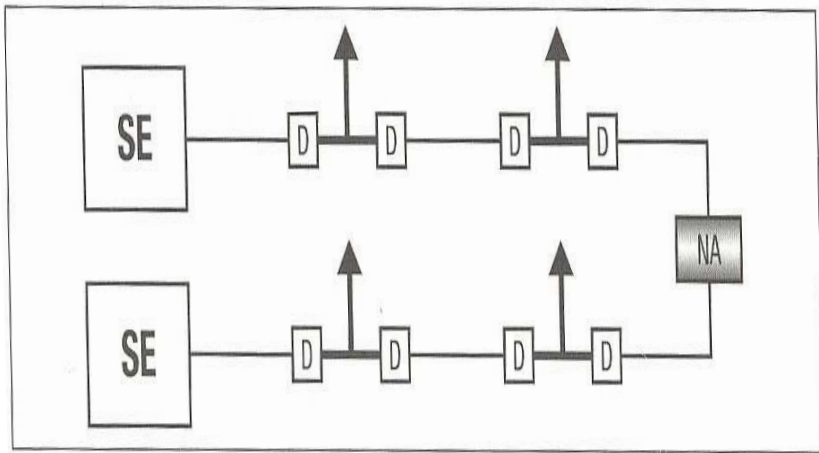
## 7. Sistema de distribuição

- Primário seletivo – aéreo, subterrâneo



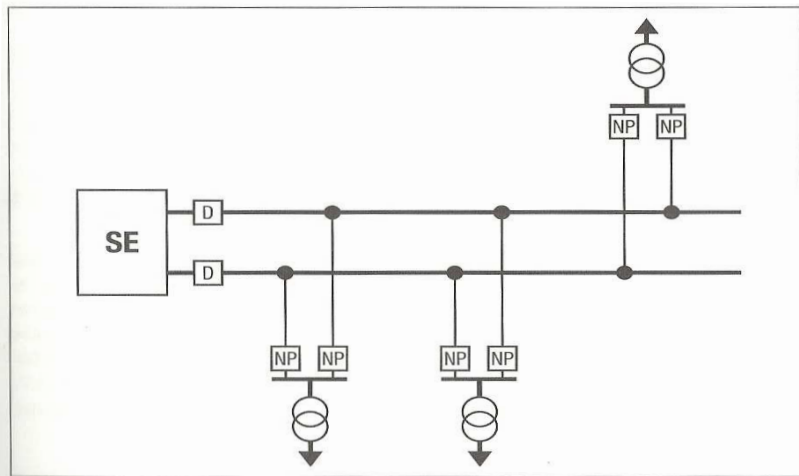
## 7. Sistema de distribuição

- Primário em malha aberta – subterrâneo



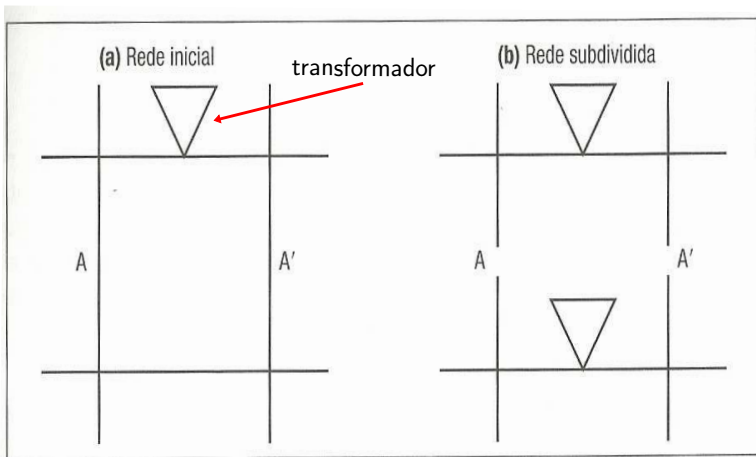
## 7. Sistema de distribuição

- Spot network – subterrâneo



## 7. Sistema de distribuição

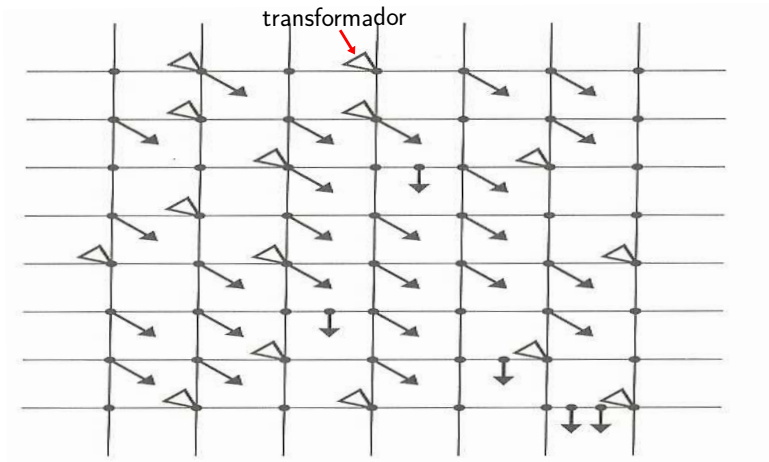
- Topologias da rede secundária (ordem crescente de custo):
- Malha (carga pequena) e radial (carga grande) – aérea





## 7. Sistema de distribuição

- Reticulada – subterrânea, custo extremamente elevado, não é mais construído



- Tipos de cargas:
  - Residenciais
  - Comerciais de iluminação e condicionamento de ar em prédios, lojas, edifícios de escritórios, etc
  - Industriais trifásicas em geral, com predomínio de motores de indução
  - Rurais de agroindústrias, irrigação, etc
  - Municipais e governamentais (serviços e poderes públicos)
  - De iluminação pública

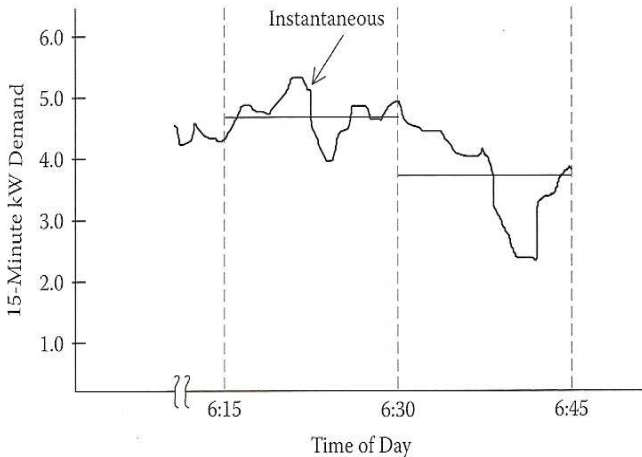
## 7. Sistema de distribuição

- Demanda: carga nos terminais receptores tomada em valor médio em um determinado intervalo de tempo



- Intervalo de tempo  $\rightarrow 0 \rightsquigarrow$  demanda instantânea
- Típico: intervalos de 10 ou 15 minutos
- Se a demanda é representada em kW, a área sob a curva fornece a energia consumida em kWh

- Diferença entre demanda (média) e demanda instantânea:

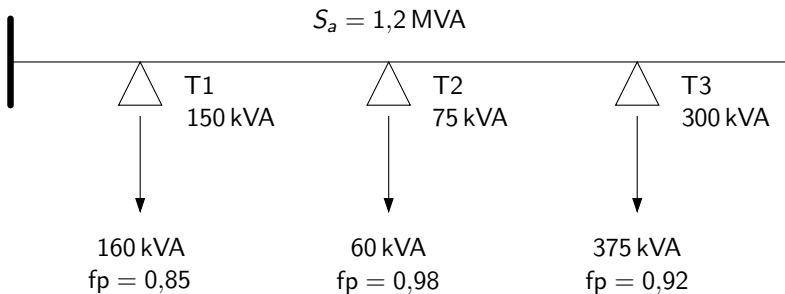


- Demanda máxima: maior de todas as demandas que ocorreram em um período especificado de tempo
- Diversidade de carga: cargas apresentam comportamento próprio, e suas demandas máximas e mínimas normalmente ocorrem em instantes diferentes
  - Demanda diversificada: num dado instante, é a soma das demandas individuais das cargas naquele instante
  - Fator de diversidade: relação entre a soma das demandas máximas do conjunto de cargas e a demanda máxima do conjunto (sempre  $> 1$ )

- Fator de demanda: num certo intervalo de tempo, é a relação entre sua demanda máxima e a carga nominal ou instalada total
- Fator de utilização: num determinado período de tempo, é a relação entre a demanda máxima do sistema e a sua capacidade

### ■ Exemplo

Considere o alimentador primário a seguir, em que representa-se a capacidade do alimentador, as potências nominais dos transformadores abaixadores e as demandas máximas mensais.





Fatores de demanda individuais dos transformadores:

$$f_{T1} = \frac{160}{150} = 1,067 \quad f_{T2} = \frac{60}{75} = 0,800 \quad f_{T3} = \frac{375}{300} = 1,250$$

Demanda máxima para o conjunto de transformadores:

$$\begin{aligned} |S_t| &= |160 \angle \cos^{-1} 0,85 + 60 \angle \cos^{-1} 0,98 + 375 \angle \cos^{-1} 0,92| \\ &= 592,08 \text{ kVA} \end{aligned}$$

Fator de demanda do conjunto:

$$f_{\text{conjunto}} = \frac{592,08}{150 + 75 + 300} = 1,28$$

Fator de utilização:

$$f_{\text{utiliz}} = \frac{592,08}{1200} = 0,493 \quad \text{ou } 49,3\%$$



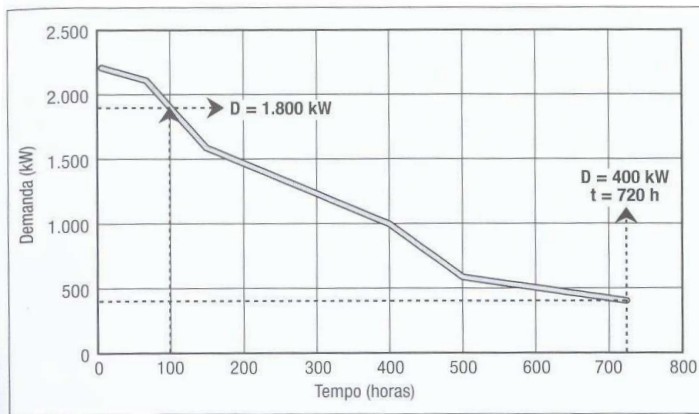
- Fator de carga: relação entre as demandas média e máxima do sistema em um certo período de tempo
- Curva de duração de carga: a curva de carga varia em função do dia (dia útil, sábado, domingo, feriado, acontecimentos extraordinários, estação, etc)

Para algumas aplicações deseja-se obter uma visão macroscópica do comportamento da carga

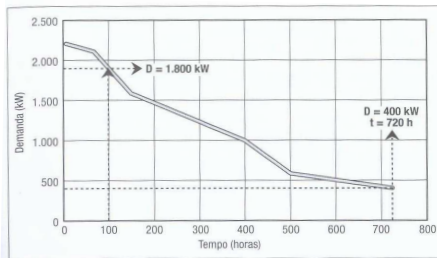
- Por exemplo: deseja-se determinar o número de horas ao longo do ano em que a carga não é maior que um certo montante, ou ainda, estabelecer a probabilidade de ocorrência de demandas em certa faixa de valores

## 7. Sistema de distribuição

- O procedimento para a obtenção da curva de duração de carga consiste em ordenar, em ordem decrescente, as demandas diversificadas verificadas no período



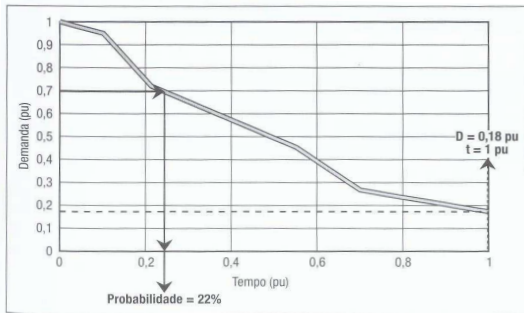
## 7. Sistema de distribuição



- Durante 100 horas do mês a demanda não é menor que 1800 kW
- Durante o mês a demanda não é menor que 400 kW

## 7. Sistema de distribuição

- Curva de duração em pu:



- Demandas maiores que 0,7 pu ocorrem durante 22% do tempo
- A probabilidade da carga exceder 70% da demanda máxima é 22%

## Exercícios propostos

1

- A qualidade do fornecimento pode ser avaliada em termos de:
  - continuidade do fornecimento (número de interrupções do serviço e tempo de duração dessas interrupções)
  - nível de tensão
  - oscilações rápidas de tensão
  - desequilíbrio da tensão
  - distorções harmônicas da tensão
- O serviço de fornecimento de energia elétrica está sujeito a sofrer interrupções



- De acordo com os **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST<sup>6</sup>**, dois tipos de índices são utilizados para avaliar os níveis de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica:
  - Indicadores de continuidade **individuais**
  - Indicadores de continuidade **coletivos**

---

<sup>6</sup>Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, disponível em <http://www.aneel.gov.br/prodist>

- Indicadores de continuidade **individuais**

- Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (DIC) (expressa em horas ou centésimos de hora):

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i)$$

em que  $n$  é o número de interrupções da unidade consumidora considerada, no período de apuração, e  $t(i)$  é o tempo de duração da interrupção  $i$  da unidade consumidora considerada ou ponto de conexão, no período de apuração

- Frequência de Interrupção individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (FIC) (expressa em número de interrupções):

$$FIC = n$$

- Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (DMIC) (expressa em horas e centésimos de hora):

$$DMIC = \max t(i), i = 1, \dots, n$$

- Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão (DICRI) (expressa em horas e centésimos de hora):

$$DICRI = t_{\text{crítico}}$$

- Indicadores de continuidade **coletivos** (referente a um conjunto de unidades consumidoras):
  - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC):

$$DEC = \frac{1}{C_c} \cdot \sum_{i=1}^{C_c} DIC_i$$

em que  $C_c$  é o número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de apuração, atendidas em BT ou MT

- Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC):

$$FEC = \frac{1}{C_c} \cdot \sum_{i=1}^{C_c} FIC_i$$

## 8. Qualidade e confiabilidade da operação

HISTÓRICO DE CONSUMO			DATAS DAS LEITURAS	
	KWh	Dias	Atual	06/02/2010
2010 FEV	277	28	Anterior	09/01/2010
JAN	393	30	No. de Dias	28
2009 DEZ	415	31	Próximo Mês	10/03/10
NOV	365	27		
OUT	508	33		
SET	572	31		
AGO	670	33		
JUL	726	30		
JUN	526	30		
MAI	435	32		
ABR	332	28		
MAR	446	31		
FEV	368	29		

LEITURAS	
Atual	30247
Anterior	29970
Fat. Multip.	1
Consumo kWh	277
No. Medidor	

INDICADORES DE QUALIDADE DO FORNECIMENTO					
CAMPINAS OESTE	DEC	FEC	DIC	FIC	DMIC
Padrão	3,30	2,70	21,00	16,00	11,00
Apurado	0,78	0,53	0,00	0,00	0,00

- Blecaute em Campinas, SP<sup>7</sup>: “Às 8h21min de uma quarta-feira, ocorreram problemas na S/E Santa Bárbara da CESP de 440/138 kV, que motivaram o desligamento dos três bancos de transformadores que totalizam 900 MVA. Como as outras S/E e usinas da região não tinham capacidade para atender o sistema, ocorreu o desligamento de 46 S/E da CPFL e 20 S/Es particulares que somavam 700 MVA e 450.000 consumidores.

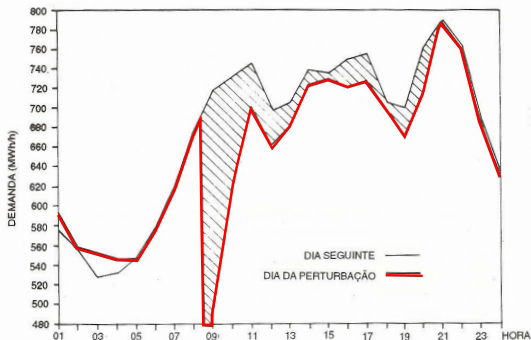
O restabelecimento de energia na S/E Santa Bárbara ocorreu depois de sete minutos, sendo que as demais S/E foram religando os consumidores em um período compreendido entre nove minutos e uma hora.

---

<sup>7</sup>Fonte: J.A. Cipoli, Engenharia de distribuição, Qualitymark, 1993.

## 8. Qualidade e confiabilidade da operação

Conforme o gráfico apresentado [a seguir], verificou-se que, apesar da ocorrência na região de Campinas ter-se registrado entre as 8h21min e 9h30min, o processo produtivo só retornou ao normal a partir das 21h do mesmo dia. Portanto, houve uma queda na atividade econômica durante cerca de 12 horas.”





- Os estudos de confiabilidade utilizam como referência para determinar a necessidade de novas linhas e/ou subestações o custo social do kWh interrompido, que pode ser estimado como sendo da ordem de 50 a 100 vezes maior que o preço médio do kWh faturado

## 8. Qualidade e confiabilidade da operação

- Na transmissão<sup>8</sup>:



**Nota à Imprensa (04/02/2014)**

**Atuação de esquema de emergência reduz efeito de ocorrência no SIN**

Às 14h03, uma perturbação no Sistema Interligado Nacional causou a abertura da interligação em 500 kV entre a Região Norte e as Regiões Sudeste/Sul, entre Colinas e Serra da Mesa, interrompendo o fluxo de 5 mil MW para essas regiões.

Para evitar a propagação do evento, houve atuação do primeiro estágio do Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC), causando o desligamento automático de cargas pré-selecionadas pelos agentes distribuidores locais, visando restabelecer a frequência do sistema.

Às 14h41, a interligação Norte-Sudeste foi religada e a frequência normalizada. Já foi iniciado o processo de recomposição das cargas desligadas.

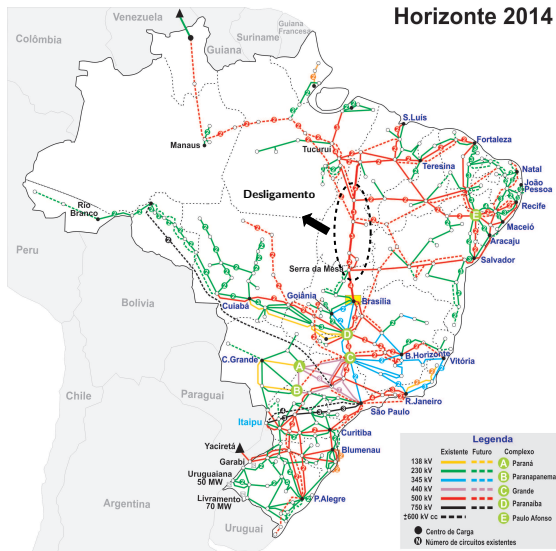
Essas informações serão atualizadas tão logo novos dados estejam disponíveis.

**Assessoria de Planejamento e Comunicação**  
**Operador Nacional do Sistema Elétrico**

---

<sup>8</sup>Fonte: [http://www.ons.org.br/download/sala\\_imprensa/notaaimprensa\\_04022014.pdf](http://www.ons.org.br/download/sala_imprensa/notaaimprensa_04022014.pdf)

## 8. Qualidade e confiabilidade da operação



## 8. Qualidade e confiabilidade da operação

- Causas e consequências.

- O termo **Automação da distribuição** abrange uma gama de implementações que vão desde a simples adaptação de controle remoto a um equipamento já existente até a utilização de dispositivos que operam com base em princípios modernos de comunicações, inteligência e otimização

O termo **automação** sugere que o processo seja auto-controlado

- Uma definição comumente adotada no setor elétrico é: “Automação da distribuição corresponde à utilização de um conjunto de tecnologias que permite o monitoramento, a coordenação e a operação de componentes da rede, de forma remota e em tempo real.”

O termo *coordenação* está diretamente ligado à *automação*

- **Distribution automation system (DAS)** – conjunto de equipamentos instalados na rede, de forma a atender os requisitos mencionados anteriormente

**Distribution management system (DMS)** – DAS acrescido de um centro de operação e controle, com interface homem-maquina (IHM) apropriada e conjunto de funções de controle que permitem a utilização mais eficiente possível dos equipamentos da rede.

### ● Por que automatizar?

- Redução dos custos de operação (por exemplo reduzindo as perdas de potência nos alimentadores) e manutenção (por exemplo eliminando deslocamentos de equipes para localização de defeitos na rede e eventuais manobras)
- Postergação de projetos de reforço da rede, já que uma operação mais eficiente permite que se opere as redes mais próximas de seus limites
- Aumento da confiabilidade, pois a automação resulta na diminuição do número de ocorrências de falta de energia, e do tempo de interrupção
- Novos serviços podem ser oferecidos aos consumidores, como medição remota, tarifas mais flexíveis em função do estabelecimento de prioridades de fornecimento, etc
- Aumento da qualidade do serviço, incluindo melhores níveis de tensão, menores componentes harmônicos, etc
- Melhor qualidade das informações obtidas pelas equipes de operação, pós-operação e planejamento

- Principais funções de controle que podem ser implementadas:
  - *Demand-side management* – permite que procedimentos previamente acordados entre a empresa e consumidores levem a deslocamentos dos horários, diminuição e até limitação dos picos de demanda
  - Controle de tensão/potência reativa – através do controle de tap de transformadores e reguladores de tensão e chaveamento de capacitores
  - Diagnóstico, localização e isolamento de faltas – pode ser feito automaticamente
  - Restabelecimento do serviço – permitindo o serviço volte rapidamente para os consumidores nas áreas que não foram afetadas pela falta
  - Reconfiguração – através da manobra de chaves, transferindo cargas entre alimentadores, com o objetivo de minimizar as perdas de potência ativa, otimizar os perfis de tensão e evitar sobrecargas
  - Qualidade da energia – através da detecção e controle de desvios de tensão, corrente e frequência que resultam em falhas ou operação anormal



## 10. Smart grids

- Veja a **apresentação da Reason**
- Veja a **Material do professor Walmir – slides 24 a 37**



## 11. Sistema de proteção e manobras

- Relés, disjuntores, pára-raios, religadores, fusíveis, chaves seccionadoras etc.



- Faz a interface com o Centro de Supervisão e Controle
- Centro de Supervisão e Controle → *Energy Management System* (EMS):
  - Avalia estado de operação da rede
  - Simula a ocorrência de possíveis falhas e determina ações de controle preventivo/corretivo
  - Determina ações para a operação econômica e segura

- SCADA ( *Supervisory Control And Data Acquisition*)
- Unidade terminal remota (UTR) – do inglês remote terminal unit (RTU)
  - Dispositivo eletrônico microcontrolado que realiza a interface entre os equipamentos do sistema elétrico e o EMS
  - Uma UTR pode monitorar parâmetros analógicos (magnitude de tensão) e digitais (estado de um disjuntor)
  - Transmite dados do sistema ao EMS e recebe sinais de controle do EMS que são aplicados ao equipamento do sistema ao qual está conectado
  - UTRs são normalmente capazes de realizar algum tipo de pré-processamento dos dados medidos antes de enviar ao EMS

## 12. Sistema de telemetria



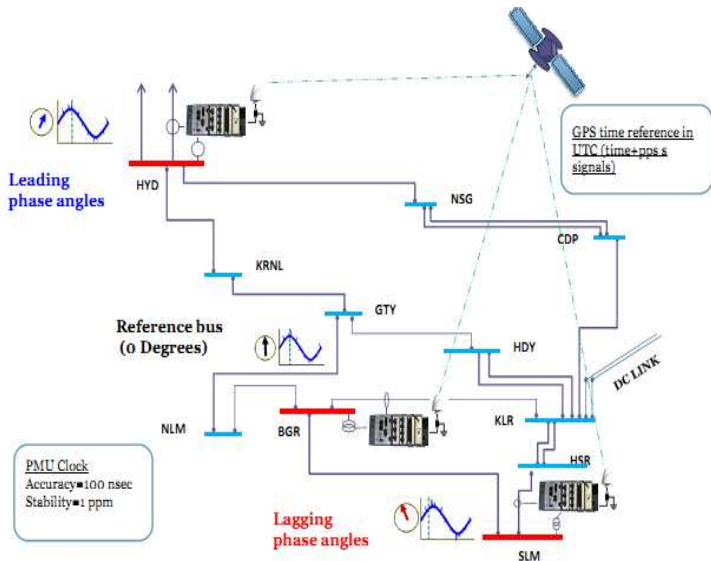
- Medição fasorial (Phasor measurement)
  - Introdução da competição nos mercados de EE
  - Restrições à expansão dos SEE
  - Requisitos crescentes de QEE
  - Redução do risco de blecautes
  - Demanda crescente pelo aprimoramento dos instrumentos de monitoração e controle em tempo real dos SEE
  - Evolução tecnológica em diversas áreas
    - Sistemas de telecomunicações
    - Informática
    - Processamento de sinais
    - Automação

- Ação de organismos reguladores – estabelecimento de responsabilidades e parâmetros de qualidade e desempenho
- Possibilita o desenvolvimento de uma série de novas aplicações
  - Automação de sistemas elétricos
  - Alívio de carga inteligente (controle de demanda)
  - Aumentar a confiabilidade de sistemas elétricos, detectando faltas incipientes e isolando-as ou redespachando o sistema
  - Aumentar a qualidade da energia, corrigindo fontes de degradação
  - Medição e controle de todo sistema simultaneamente

- Medição simultânea de grandezas elétricas em instalações distantes geograficamente usando PMU (Phasor Measurement Units)
- Medições sincronizadas no tempo via sinal de satélite (GPS) – obtenção dos ângulos de fase dos fasores
- Aquisição e tratamento de dados em local remoto (PDC)
- Taxa de atualização (varredura) muito maior que SCADA
- Permite a monitoração e o controle da dinâmica dos SEE
- Novo paradigma para a operação

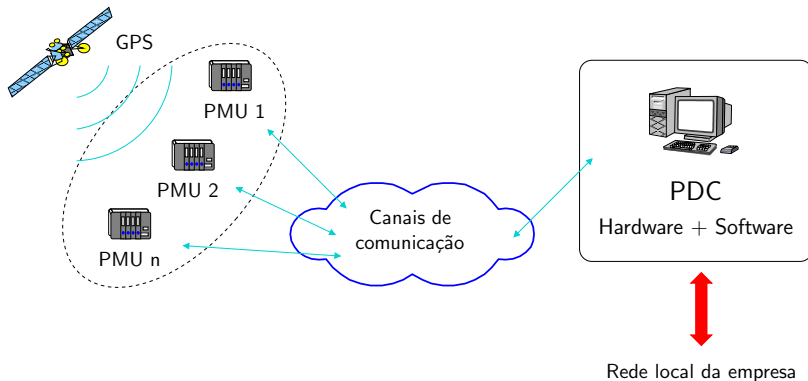


## 12. Sistema de telemetria



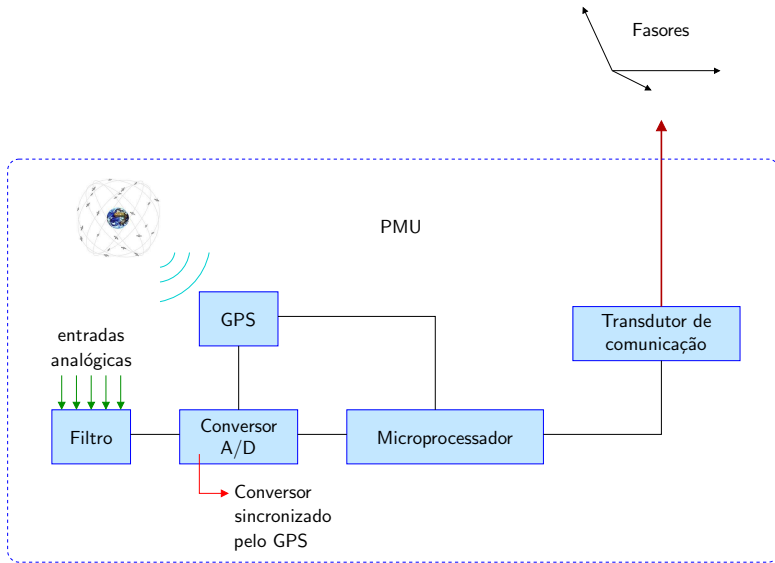
## 12. Sistema de telemetria

- Estrutura básica – unidades de medição fasorial (PMUs) conectadas a um Concentrador de Dados (PDC) através de um link de comunicação



- PMU (Phasor Measurement Unit)
  - Composta por um receptor de sinal de GPS, sistema de aquisição (filtro + módulo de conversão A/D), e um microprocessador
  - Realiza a aquisição das tensões e correntes das barras e linhas
  - Processa os dados amostrados, obtendo assim os valores complexos de tensão e corrente
  - Formata os dados obtidos segundo um padrão (IEEE 1344/95 ou IEEE C37.118/2005)
  - Envia as medidas fasoriais formatadas ao concentrador de dados

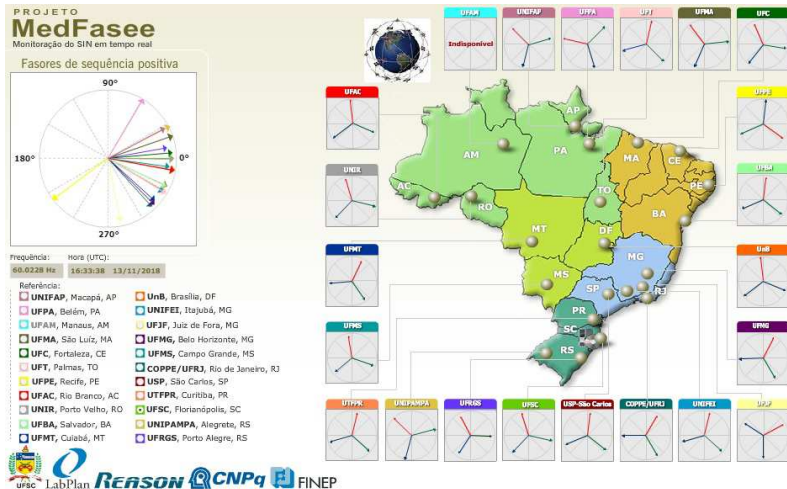
## 12. Sistema de telemetria



SCADA	SPMS
Taxas de atualização entre 2 e 5 segundos	Taxas entre 10 e 60 atualizações por segundo
Dados não sincronizados no tempo	Dados sincronizados no tempo
Links de comunicação tradicionais (normalmente lentos)	Compatíveis com as tecnologias modernas de comunicação
Permite visualizar o comportamento estático do sistema	Permite visualizar o comportamento dinâmico do sistema

- Questões:
  - Tecnologias e padrões de comunicação
  - Cyber security
  - Quantidade de dados
  - Precisão dos dados
  - ...
- Veja também estes materiais:
  - Curso CIGRÉ
  - FAQ Certs
  - Monografia UFSC

## 12. Sistema de telemetria



## Projeto Medfasee

### 13. Sistema de transmissão em corrente contínua

- Envolve tecnologia de estado sólido (eletrônica de potência)  
Transmissão em CC não é econômica para distâncias menores que 500 km

Exemplo no Brasil  
Sistema de geração e transmissão de Itaipu:





### 13. Sistema de transmissão em corrente contínua

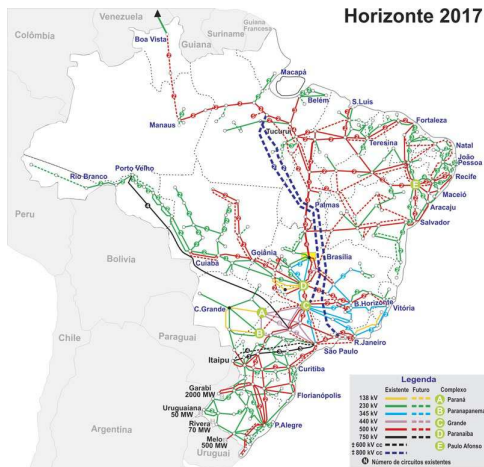
- Usina hidrelétrica de Itaipu, situada no rio Paraná
- Apresenta dois sistemas de transmissão, com corrente alternada e com corrente contínua
  - CA: 750 kV (eficaz de linha)
  - CC: bipólo de +600 kV e -600 kV (tensão entre pólos de 1200 kV)
- Geradores
  - Brasil – energia gerada a 60 Hz
  - Paraguai – energia gerada a 50 Hz
- Energia gerada no Paraguai que vem para o Brasil: 50 Hz retificada e transmitida em CC (Foz do Iguaçu). CC transformado em 60 Hz (Ibiuna)

- Vários problemas relacionados com SEE devem ser enfrentados pelos profissionais da área, que vão desde a operação diária da rede até estudos de planejamento da sua expansão, como por exemplo:
  - operação em tempo real – garantir que geração atenda à demanda
  - análise de segurança em tempo real – avaliar efeitos de eventuais alterações na rede; determinar estratégias de controle preventivo/corretivo
  - operação econômica (despacho econômico) – determinação das potências entregues por cada gerador de forma a minimizar custo total de geração
  - proteção de sistemas
  - planejamento da expansão do sistema de transmissão
  - planejamento da expansão do sistema de geração
  - outros . . .

- O tamanho, a complexidade e os níveis de potência envolvidos na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica aumentaram muito desde Edison → fato mundial
- É difícil para o operador e para o planejador terem a sensibilidade que tinham antes e poderem prever o resultado de manobras ou defeitos
- Todas as tarefas de operação devem ser realizadas em tempo real → restrição de tempo severa

## 14. Área de sistemas de energia elétrica

- Exemplo: o SIN (Sistema Interligado Nacional), que tem dimensão continental



## 14. Área de sistemas de energia elétrica

- Comparação com os EUA
- Comparação com a Europa

- Solução – utilizar o computador como ferramenta para:
  - obter modelos precisos e confiáveis dos componentes da rede  
→ **MODELAGEM**
  - colocá-los juntos formando um grande circuito elétrico  
→ **MODELAGEM**
  - desenvolver métodos apropriados de resolução de circuitos  
→ **SOLUÇÃO**
  - simular cenários de operação  
→ **SIMULAÇÃO**
  - analisar os resultados  
→ **ANÁLISE**

- A solução dos problemas acima requereu e ainda requer muita pesquisa para a obtenção de métodos eficientes de abordagem dos mesmos
- A área de SEE é muito ativa do ponto de vista de pesquisa e tem havido grande desenvolvimento nos últimos anos
- Pesquisa no Brasil: universidades, programa de P&D/Aneel

- SEE têm em torno de 130 anos
- $\sim 1876$  – não se sabia ainda qual a melhor maneira de transmitir a energia de uma queda de água para um centro distante (tubulação de ar comprimido? óleo?)
- No caso da transmissão de energia elétrica não se sabia se seria melhor utilizar corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). No caso de CA, não se sabia com que frequência nem com que número de fases



- Corrente alternada era gerada por máquinas chamadas *alternadores*. Corrente contínua era gerada por máquinas chamadas *dínamos*
- Corrente contínua parecia apresentar algumas vantagens sobre corrente alternada

Baterias podiam ser usadas como *backup* em situações de emergência quando os *dínamos* falhavam, ou ainda suprir potência durante períodos de demanda baixa

Além disso, *dínamos* podiam operar em paralelo para atender a demanda crescente

Naquela época, o uso de alternadores em paralelo era considerado muito difícil devido a problemas de sincronização

- Sequência cronológica (resumo):

### No mundo

Ano	Fato
1876	Início da concorrência para a construção do complexo de Niagara Falls → fato marcante na evolução da área.
1880	Thomas Alva Edison apresenta sua lâmpada incandescente (em corrente contínua), a mais eficiente de então.  Na Europa há avanços na área de corrente alternada.

Ano	Fato
1882	Edison coloca em funcionamento um sistema de corrente contínua em New York (empresa Edison Electric Company) → Pearl St. Station → geradores CC (na época chamados dínamos) acionados por motores a vapor supriam 30 kW em 110 V a 59 consumidores → iluminação incandescente → área de 1 milha quadrada.
1884	Criado o American Institute of Electrical Engineers (AIEE), depois transformado no The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
1885	George Westinghouse Jr. compra os direitos da patente de Goulard-Gibbs para construir transformadores e encarrega William Stanley de construí-los.

Ano	Fato
1886	<p>Já há cerca de 60 centrais de corrente contínua (Edison) com cerca de 150.000 lâmpadas.</p> <p>Stanley coloca em operação a primeira central em corrente alternada (Westinghouse) em Great Barrington, Massachussets → 150 lâmpadas.</p>
1887	<p>Já existem cerca de 120 sistemas de corrente contínua com cerca de 325.000 lâmpadas.</p> <p>Empresa de Westinghouse cresce muito e já conta com cerca de 125.000 lâmpadas em corrente alternada.</p>

Ano	Fato
1888	<p>Edison passa a atacar duramente os sistemas de corrente alternada.</p> <p>Preço do cobre sobe muito devido ao monopólio de um sindicato francês.</p> <p>Existia medidor de energia somente para corrente contínua (sistema eletroquímico). Os sistemas em corrente alternada cobravam por número de lâmpadas. Tinham de produzir de 40% a 80% a mais que os sistemas em CC para mesmo número de consumidores.</p>

Ano	Fato
	Shallenberger (engenheiro chefe de Westinghouse) coloca em funcionamento um medidor de energia em CA que fornece uma leitura direta de quanta energia é consumida e, portanto, superior ao medidor de Edison.
	Nikola Tesla publica um artigo em que mostra ser possível construir um motor em CA.
	Westinghouse compra a patente de Tesla e o contrata para desenvolver o motor (que só ficaria pronto em 1892).

Ano	Fato
1890	<p>Empresa de Edison e o próprio endurecem ainda mais a discussão. Edison defendia a confiabilidade dos sistemas de corrente contínua e o perigo apresentado por tensões em corrente alternada.</p> <p>Primeira linha de transmissão em CA é posta em operação para transportar energia elétrica gerada em uma usina hidroelétrica desde Willamette Falls até Portland, Oregon (20 km, 4 kV, monofásica).</p> <p>Morte de animais (cães e cavalos) através de corrente alternada.</p> <p>Primeira execução em cadeira elétrica (06 Ago 1890) na prisão de Auburn, NY, foi em corrente alternada (gerador Westinghouse).</p>

Ano	Fato
	<p><i>When the chair was first used, on August 6, 1890, the technicians on hand misjudged the voltage needed to kill the condemned prisoner, William Kemmler. The first jolt of electricity was not enough to kill Kemmler, and only left him badly injured. The procedure had to be repeated and a reporter on hand described it as “an awful spectacle, far worse than hanging.” George Westinghouse commented: “They would have done better using an axe.”</i> (Fonte: <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/War_of_Currents">http://en.wikipedia.org/wiki/War_of_Currents</a>)</p>



Ano	Fato
1892	<p>Entra em funcionamento o primeiro motor de indução de Tesla.</p> <p>Comissão responsável pela concorrência de Niagara Falls decide que o sistema será em corrente alternada.</p> <p>Alemanha: é colocado em funcionamento um sistema de 100 HP (74,6 kW) com transmissão de 160 km em corrente alternada, 30 kV.</p> <p>A empresa de Edison (Edison Electric Co.) junta-se a outra, a Thomson-Houston, formando a General Electric que passa a produzir transformadores e alternadores em larga escala.</p>

Ano	Fato
1893	Westinghouse ganha a concorrência para fornecer os alternadores e transformadores de Niagara Falls.  Columbian Exhibition em Chicago → apresentado sistema de distribuição bifásico. A partir de então, a transmissão em CA trifásica foi gradualmente substituindo os sistemas CC. Veja <a href="#">isto</a> .
1896	Entra em funcionamento o complexo de Niagara Falls, com transmissão de energia até Buffalo encerrando a discussão sobre CC e CA. Eram transmitidos 10 MW de potência (valor alto para a época) até Buffalo em uma distância de 20 milhas.

Ano	Fato
1920	Primeiras interconexões regionais ( <i>regional grids</i> ) começaram a ser formadas.
1954	Primeira linha de transmissão HVDC moderna → Vastervik – ilha de Gotland (Suécia) → 100 kV, 100 km.
1957	Primeira usina nuclear em Shippingport, PA, implantada por Westinghouse Co. and Duquesne Light and Power Co.
1965	Grande blecaute do Nordeste dos EUA → alavancou efetivamente o desenvolvimento dos centros de supervisão e controle de redes. Só foi superado pelo blecaute de 14 de agosto de 2003 na costa Nordeste dos EUA e Canadá.

Ano	Fato
1970	Primeira linha de transmissão HVDC nos EUA $\rightarrow \pm 400$ kV, 1360 km $\rightarrow$ interligação do Pacífico, entre Oregon e Califórnia.
70 $\rightarrow$	Crise do petróleo $\rightarrow$ motivou a pesquisa por fontes alternativas de energia: eólica, célula combustível, célula solar.

## No Brasil

Ano	Fato
1883	Primeira usina termelétrica instalada em Campos, RJ, para alimentação de iluminação pública.  Primeira usina hidrelétrica instalada no Brasil, no rio Jequitinhonha, em Diamantina, MG, para alimentação de uma empresa mineradora.

Ano	Fato
1889	Usina hidrelétrica Marmelos-Zero, no rio Paraibuna, em Juiz de Fora, MG, foi a primeira usina hidrelétrica do país e da América Latina a fornecer energia elétrica para iluminação pública. Foi desativada em 1896.



Ano	Fato
1920	Cerca de 300 empresas servem a 431 localidades com capacidade instalada de 354.980 kW, sendo 276.100 kW em usinas hidroelétricas e 78.880 kW em termoelétricas.
1930	A capacidade instalada de energia elétrica do Brasil era em torno de 780 MW.
1939	Número de empresas chega a 1176, com 738 hidroelétricas e 637 termoelétricas.

Ano	Fato
	Mais de 70% de toda a capacidade instalada no Brasil pertencia a duas empresas: a LIGHT (Brazilian Traction Light & Electric Co.) servia a parte de SP e RJ, e a AMFORP (American & Foreign Power Co.) servia parte de SP, Curitiba, Porto Alegre, Pelotas, Niterói, Petrópolis, Belo Horizonte, Natal, Recife, Maceió, Salvador, Vitória.
1940	A capacidade instalada de energia elétrica do Brasil era em torno de 1.250 MW.



Ano	Fato
1948	<p>Criação da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) de economia mista para construir a usina de Paulo Afonso.</p> <p>Mais tarde foram criadas a CEMIG em MG, USELPA e CHERP (depois incorporadas à CESP) em SP, COPEL no PR, FURNAS na região centro-sul.</p>
1950	<p>A capacidade instalada de energia elétrica do Brasil era em torno de 1.900 MW.</p>
1960	<p>A capacidade instalada de energia elétrica do Brasil era em torno de 4.800 MW.</p>

Ano	Fato
1961	Criada a Eletrobrás, como responsável pela política de energia elétrica no país.
1968	Foi criado o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE. Consolidava-se a estrutura básica do setor, sendo a política energética traçada pelo MME e executada pela Eletrobrás, atuando o DNAEE como órgão normativo e fiscalizador.
1970	A capacidade instalada de energia elétrica no Brasil era em torno de 11.460 MW.

Ano	Fato
1973	Criados os Grupos Coordenadores para Operação Interligada – GCOIs, os quais tinham a finalidade de coordenar, decidir ou encaminhar as providências necessárias ao uso racional das instalações geradoras e de transmissão, existentes e futuras, nos sistemas interligados das regiões sudeste e sul.

Ano	Fato
70-80	O setor elétrico atingiu seu ápice, representado pelo “milagre econômico”, e experimentou também o início de seu declínio, ou a “década perdida”, passando incólume pela crise do petróleo em 1973, tendo construído as maiores obras de geração hidrelétrica do país, o início do programa nuclear brasileiro (usina nuclear Angra I, entrando em fase de testes em 1981, em operação experimental em março de 1982 e em operação comercial em janeiro de 1985. Angra II somente entraria em operação em 2000), os grandes sistemas de transmissão em 440 e 500 kV, os sofisticados sistemas de supervisão e controle e o tratado de Itaipu, em 1973, cuja obra iniciou-se em 1975, sendo concluída somente em 1991.

Ano	Fato
1980	A capacidade instalada de energia elétrica no Brasil era em torno de 31.300 MW.
1990	A capacidade instalada de energia elétrica no Brasil era em torno de 53.000 MW.
1995	Foi aprovada a lei n. 8.967, que regulamentava os preceitos de licitação para concessões e deu, assim, início à competição no setor elétrico.

Ano	Fato
1996	Através da lei n. 9.427, foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, autarquia em regime especial, vinculada ao MME, com as atribuições de regular e fiscalizar a geração, a transmissão, a distribuição e a comercialização da energia elétrica, atender reclamações de agentes e consumidores, mediar os conflitos de interesses entre os agentes do setor elétrico e entre estes e os consumidores, conceder, permitir e autorizar instalações e serviços de energia, garantir tarifas justas, zelar pela qualidade do serviço, exigir investimentos, estimular a competição entre os geradores e assegurar a universalização dos serviços. A Aneel passou a funcionar, efetivamente, a partir de 1997, quando foi extinto o DNAEE, do qual é sucessora.

Ano	Fato
1998	<p>O Operador Nacional do Sistema – ONS foi instituído pela lei n. 9.648/98, vindo assumir progressivamente as funções até então do GCOI. As atribuições principais do ONS são operar o Sistema Interligado Nacional (SIN) e administrar a rede básica de transmissão de energia, por delegação dos agentes (empresas de geração, transmissão e distribuição de energia), seguindo regras, metodologias e critérios codificados nos Procedimentos de Rede aprovados pelos próprios agentes e homologados pela Aneel.</p> <p>Foi instituído pela lei n. 9.648/98 o Mercado Atacadista de Energia Elétrica – MAE, para ser o ambiente onde se processam a contabilização e a liquidação centralizada no mercado de curto prazo.</p>

Ano	Fato
2000	A capacidade instalada de energia elétrica no Brasil era em torno de 72.200 MW.
2001	Foi decretado o racionamento de energia elétrica, nas regiões sudeste, centro-oeste, nordeste e norte, que perdurou até fevereiro de 2002.
2003	A capacidade instalada de energia elétrica no Brasil era em torno de 77.300 MW.



Ano	Fato
2004	Foram aprovadas as leis n. 10.848 e 10.847 que, resumidamente, definem o modelo do setor elétrico com as seguintes características principais: <b>(i)</b> a criação das “figuras” da energia existente, também chamada de energia velha e da energia de novos empreendimentos, também chamada de energia nova, criando formas distintas de comercialização dessas energias; <b>(ii)</b> a existência de dois ambientes de contratação, o Ambiente de Contratação Livre – ACL e o Ambiente de Contratação Regulada – ACR; <b>(iii)</b> o “retorno” ao planejamento setorial e criação do planejamento energético, com a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE, vinculada ao MME; <b>(iv)</b> a extinção do MAE e criação da Câmara de Comercialização de Energia – CCEE, com funções mais abrangentes;

Ano	Fato
	e <b>(v)</b> a redefinição dos papéis do MME, que passa a ser o executor da política energética emanada do Conselho Nacional de Política Energética – CNPE e da Aneel, que passa a ter a função exclusiva de regulação e fiscalização.
2008	A capacidade instalada de energia elétrica no Brasil era em torno de 93.500 MW.

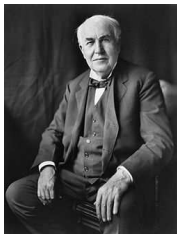
- <http://www.dee.ufc.br/~rleao/>
- [http://www.ieee.org/web/aboutus/history\\_center/about/historical\\_articles.html](http://www.ieee.org/web/aboutus/history_center/about/historical_articles.html)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Utility\\_frequency](http://en.wikipedia.org/wiki/Utility_frequency)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/War\\_of\\_Currents](http://en.wikipedia.org/wiki/War_of_Currents)
- [http://gnu.ets.kth.se/~nt/tmp/electricity\\_supply\\_in\\_the\\_uk\\_a\\_chronology.pdf](http://gnu.ets.kth.se/~nt/tmp/electricity_supply_in_the_uk_a_chronology.pdf)
- [http://www.ceb5.cepel.br/arquivos/artigos\\_e\\_documentos/Curso\\_de\\_Medicao\\_Sincronizada\\_de\\_Fasores/Topico 1 - Visao Geral - Decker.pdf](http://www.ceb5.cepel.br/arquivos/artigos_e_documentos/Curso_de_Medicao_Sincronizada_de_Fasores/Topico_1_-_Visao_Geral_-_Decker.pdf)
- [http://www.labplan.ufsc.br/RTs/RT\\_01\\_2003\\_Juliana.pdf](http://www.labplan.ufsc.br/RTs/RT_01_2003_Juliana.pdf)

- Discussões da lista POWER-GLOBE (<http://listserv.nodak.edu/archives/power-globe.html>).
- F.L. Alvarado, R.J. Thomas, A brief history of the power flow, IEEE Spectrum, vol.38, n.2, Fev 2001.
- D. Morton, The electrical century, Proceeding of the IEEE, vol.87, n.3, Mar 1999.
- A.J. Monticelli, A.V. Garcia, Introdução a sistemas de energia elétrica, Unicamp, 1999.
- P. Kundur, Power system stability and control, EPRI, 1994.
- L. Philipson, H.L. Willis, Understanding electric utilities and de-regulation, Marcel Dekker, 1999.
- A.H. Robbins, W.C. Miller, Circuit analysis with devices: theory and practice, Delmar Learning, 2004.

- J.J. Grainger, W.D. Stevenson, Power System Analysis, McGraw-Hill, 1994.
- J.D. Glover, M. Sarma, Power System Analysis and Design, PWS-KENT, 1989.
- *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers*, vol.64, no.6, September 1976.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (<http://www.aneel.gov.br>).
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (<http://www.ons.com.br>).
- D. Morton, The Electrical Century – Powering the Electrical Century, *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers*, vol.64, no.6, September 1976.
- N. Marcolin, Rotas da eletricidade, Revista Pesquisa FAPESP, n.118, Dezembro de 2005.

- W.H. Kersting, Distribution system modeling and analysis, CRC Press, 2007.
- N. Kagan, C.C.B. de Oliveira, E.J. Robba, Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica, Edgard Blücher, 2005.
- J.A. Cipoli, Engenharia de distribuição, Qualitymark, 1993.
- J. Northcote-Green, R. Wilson, Control and automation of electrical power distribution systems, Taylor & Francis, 2007.
- J.A. Momoh, Electric power distribution, automation, protection, and control, CRC Press, 2008.
- A.R. Bergen, V. Vittal, Power Systems Analysis, 2nd Edition, Prentice Hall, 2000.

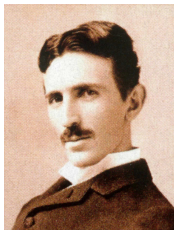




Thomas Alva Edison (Milan, OH, EUA, 11 de Fevereiro de 1847 – West Orange, NJ, EUA, 18 de Outubro de 1931) – foi um inventor e empresário dos Estados Unidos que desenvolveu muitos dispositivos importantes de grande interesse industrial. O Feiticeiro de Menlo Park (The Wizard of Menlo Park) foi um dos primeiros inventores a aplicar os princípios da produção maciça ao processo da invenção. Algumas de suas principais contribuições são: a invenção do fonógrafo, a primeira câmera cinematográfica bem-sucedida, a transformação do antigo telefone, inventado por Alexander Graham Bell, em um aparelho que funcionava muito melhor, o aprimoramento da máquina de escrever, desenvolvimento de alimentos empacotados a vácuo, desenvolvimento dos aparelhos de raios X. Dentre as suas contribuições mais universais para o desenvolvimento tecnológico e científico encontra-se a lâmpada elétrica incandescente, o gramofone, o cinescópio ou cinetoscópio, o ditafone e o microfone de grânulos de carvão para o telefone. Edison é um dos precursores da revolução tecnológica do século XX. Teve papel determinante na indústria do cinema. A ele são atribuídas mais de 1300 patentes, ainda que nem todas sejam de invenções de sua própria autoria.

“O gênio consiste em um por cento de inspiração e noventa e nove por cento de transpiração.”





Nikola Tesla (Smiljan, Império Austríaco, 10 de Julho de 1856 – Nova Iorque, 7 de Janeiro de 1943) – foi um inventor nos campos da engenharia mecânica e electrotécnica. As patentes de Tesla e o seu trabalho teórico formam as bases dos modernos sistemas de potência elétrica em corrente alternada (AC), incluindo os sistemas polifásicos de distribuição de energia e o motor AC, com os quais ajudou na introdução da Segunda Revolução Industrial. Depois da sua demonstração de transmissão sem fios (rádio) em 1894 e após ser o vencedor da “Guerra das Correntes”, tornou-se largamente respeitado como um dos maiores engenheiros electrotécnicos que trabalhavam nos EUA. Devido à sua personalidade excêntrica e às suas afirmações aparentemente bizarras e inacreditáveis sobre possíveis desenvolvimentos científicos, Tesla caiu eventualmente no ostracismo e era visto como um cientista louco. Nunca tendo dado muita atenção às suas finanças, Tesla morreu empobrecido aos 86 anos. A unidade de SI que mede a densidade do fluxo magnético ou a indução magnética (geralmente conhecida como campo magnético  $B$ ), o tesla, foi nomeada em sua honra (na Conférence Générale des Poids et Mesures, Paris, 1960), assim como o efeito Tesla da transmissão sem-fio de energia para aparelhos electrónicos com energia sem fio. À parte os seus trabalhos em eletromagnetismo e engenharia eletromecânica, Tesla contribuiu em diferentes medidas para o estabelecimento da robótica, controle remoto, radar e ciência computacional, e para a expansão da balística, física nuclear, e física teórica. Em 1943 o Supremo Tribunal dos Estados Unidos acreditou-o como sendo o inventor do rádio.



Charles Proteus Steinmetz, pseudônimo de Karl August Rudolf Steinmetz (9 de abril de 1865, Breslau, Alemanha (hoje Polônia) – 26 de outubro de 1923, Schenectady, NY, EUA) – engenheiro eletricitista, reconhecido por: (1) seu trabalho na área de eletromagnetismo; (2) desenvolver método de cálculo de grandezas elétricas alternadas utilizando números complexos; (3) sua pesquisa em iluminação; (4) ter inventado os circuitos trifásicos; (5) ter desenvolvido uma expressão para as perdas de histerese em circuitos magnéticos.

Até 1893, a análise de circuitos de corrente alternada era feita utilizando elementos de cálculo diferencial e integral, resultando em um processo difícil e trabalhoso. Steinmetz reduziu-a a “um simples problema de álgebra”. O conceito chave desta simplificação foi o **fasor**, que representa tensões e correntes alternadas como números complexos. Steinmetz definiu ainda uma grandeza chamada **impedância**, que corresponde à relação entre os fasores de tensão e corrente.



Gustav Robert Kirchhoff (Königsberg, 12 de março de 1824 – Berlim, 17 de outubro de 1887) – foi um físico alemão, com contribuições científicas principalmente no campo dos circuitos elétricos, na espectroscopia, na emissão de radiação dos corpos negros e na teoria da elasticidade (modelo de placas de Kirchhoff). Kirchhoff propôs o nome de "radiação do corpo negro" em 1862. É o autor de duas leis fundamentais da teoria clássica dos circuitos elétricos e da emissão térmica.