

SEL-5760

Power Distribution

Power Quality

Main Goals

- ⇒ *Basic concepts about power quality in distribution systems*
- ⇒ *Main problems and challenges regarding PQ in distribution systems*
- ⇒ *The focus here is on voltage and current characteristics not in reliability*
- ⇒ *Harmonic Issues*

Main Background

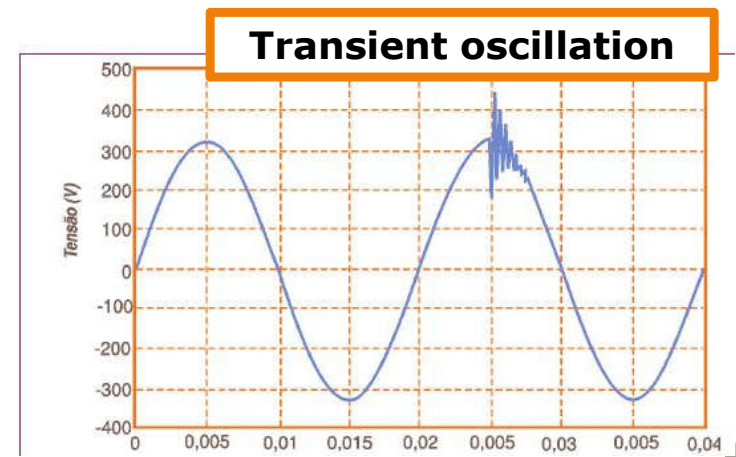
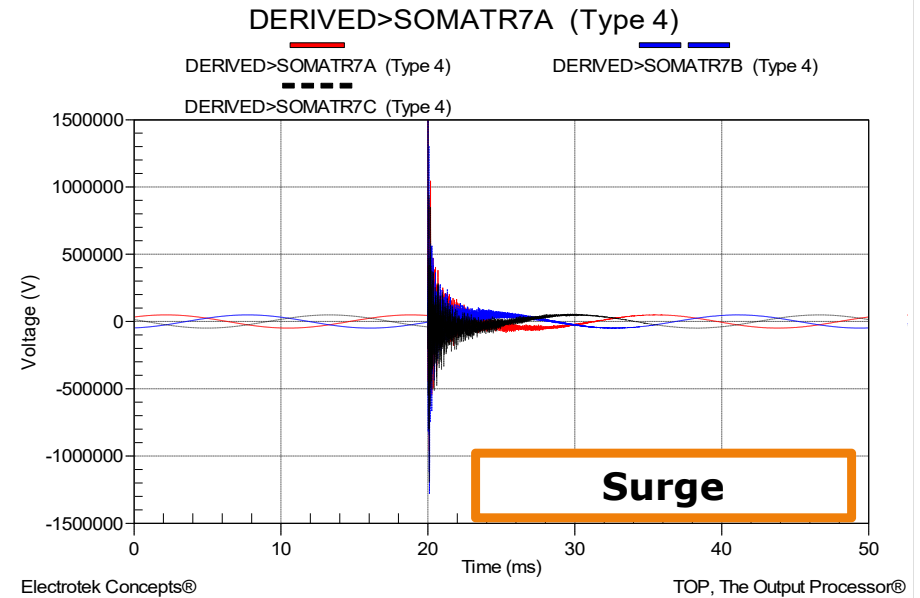
⇒ What a good PQ means?

- Voltages and currents as sine waves (non-distorted)
- Balanced voltages and currents for three-phase systems
- Voltage values (rms) within statutory ranges (both steady-state and transiente)
- Electrical frequency within statutory ranges.

PQ Disturbances (IEEE Std 1159 - 2009)

⇒ **Transient variations:** sudden variations on the instantaneous value.

- Impulsive: e.g. lightning
- Oscillatory: e.g. equipment switching



PQ Disturbances (IEEE Std 1159 - 2009)

⇒ **Short duration variations (rms)**: typically caused by short-circuits and equipment energization.

- **Voltage Sag:**

- **Instantaneous:** 0.5 – 30 cycles / 0.1 - 0.9 pu
- **Momentary:** 30 cycles – 3 sec / 0.1 – 0.9 pu
- **Temporary:** > 3 sec. – 1 min / 0.1 – 0.9 pu

- **Voltage Swell**

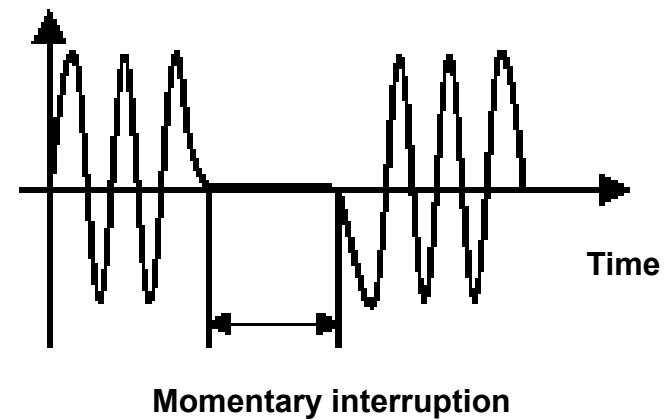
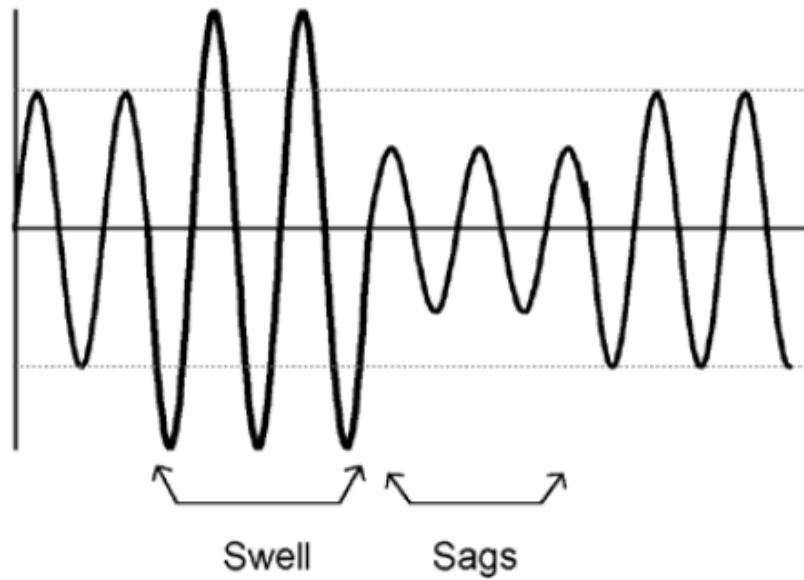
- **Instantaneous:** 0.5 – 30 cycles / 1.1 – 1.8 pu
- **Momentary:** 30 cycles – 3 sec / 1.1 – 1.4 pu
- **Temporary:** > 3 sec. – 1 min / 1.1 – 1.2 pu

- **Interruption**

- **Momentary:** 0.5 cycles – 3 sec / < 0.1 pu
- **Temporary:** > 3 sec. – 1 min / < 0.1 pu

PQ Disturbances (IEEE Std 1159 - 2009)

⇒ Examples



PQ Disturbances (IEEE Std 1159 - 2009)

⇒ **Waveform distortion**

- DC offset
- Harmonics
- Interharmonics
- Notching
- Noise

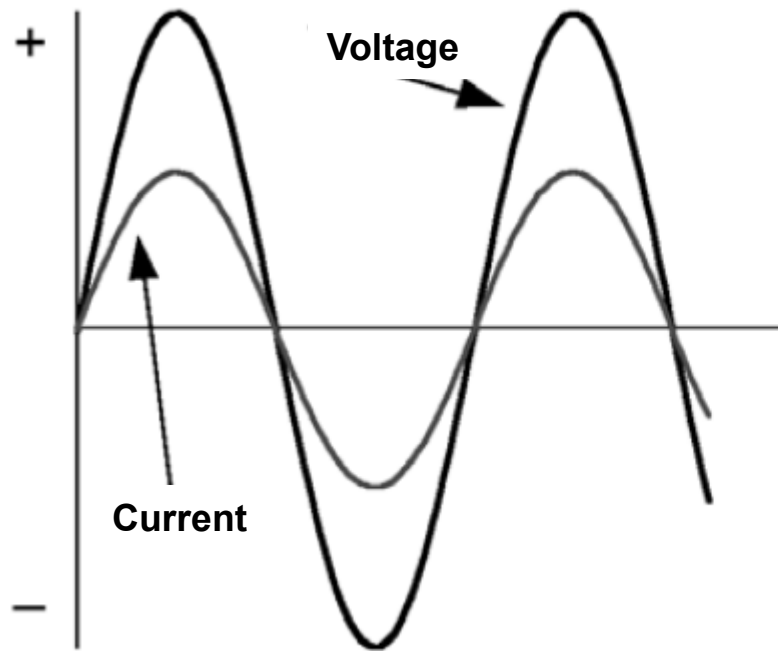
⇒ **Voltage fluctuations**

⇒ **Power frequency variations**

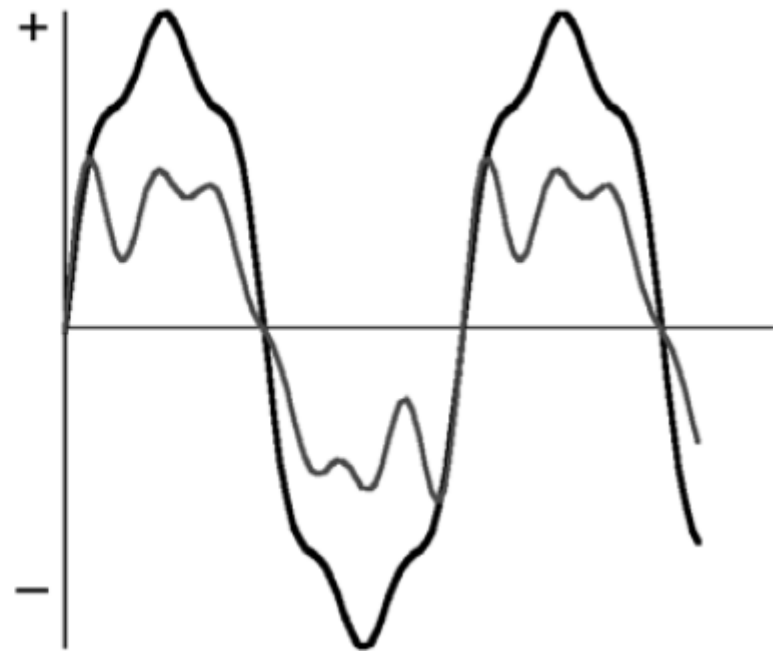
Harmonics

Harmonics

- ⇒ Distortions in the voltage and/or current waveforms
- ⇒ **Linear Loads:** voltage and current are proportional. Examples?
- ⇒ **Non-Linear Loads:** voltage and current are not proportional. Examples?



Linear



Non-Linear

Harmonics

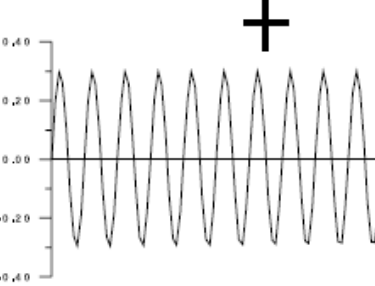
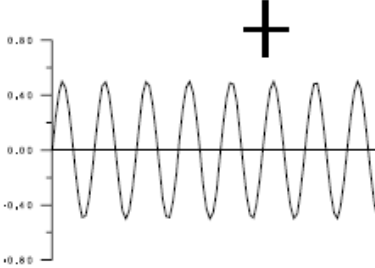
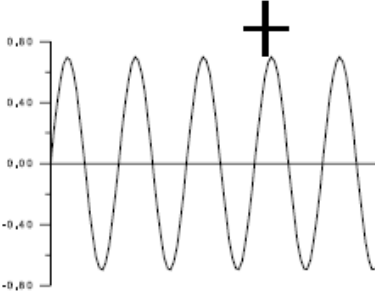
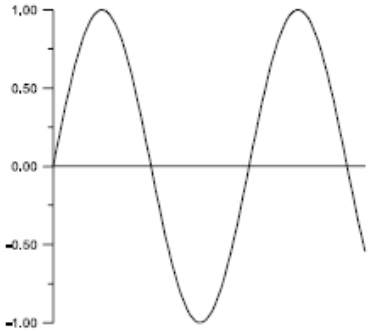
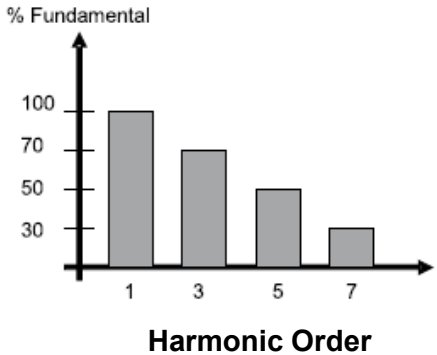
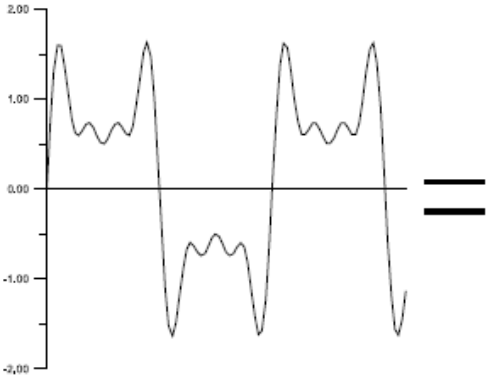
⇒ **Mathematical Background**

⇒ **The Fourier Series**

$$V(t) = V_0 + V_1 \cos(\omega t + \phi_{v1}) + V_2 \cos(2\omega t + \phi_{v2}) + V_3 \cos(3\omega t + \phi_{v3}) + \\ + V_4 \cos(4\omega t + \phi_{v4}) + V_5 \cos(5\omega t + \phi_{v5}) + \dots + V_n \cos(n\omega t + \phi_{vn})$$

$$I(t) = I_0 + I_1 \cos(\omega t + \phi_{i1}) + I_2 \cos(2\omega t + \phi_{i2}) + I_3 \cos(3\omega t + \phi_{i3}) + \\ + I_4 \cos(4\omega t + \phi_{i4}) + I_5 \cos(5\omega t + \phi_{i5}) + \dots + I_n \cos(n\omega t + \phi_{in})$$

Harmonics



Harmonics

⇒ **Total Harmonic Distortion (THD):** according to IEEE Std. 519-1992.

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2}$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}$$

$$\text{THD}_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100 \%$$

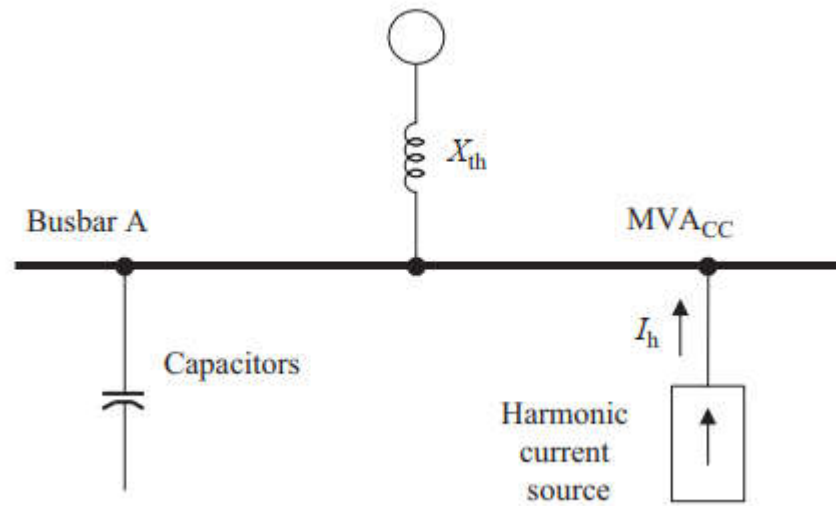
$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_D} \times 100\%$$

V_{rms}	rms voltage of a node
I_{rms}	rms current through a branch or element of the system
THD_V	Total harmonic voltage distortion in a node
THD_I	Total harmonic current distortion of the current through a branch or element of the system
TDD	Total harmonic current distortion of the current through a branch or element of the system based on the maximum demand current
V_1	Fundamental component of the voltage in a node
I_1	Fundamental component of the current through a branch or element of the system
V_n	Harmonic component of order n of the voltage in a node
I_n	Harmonic component of order n of the current through a branch or element of the system
I_D	Calculated maximum demand current through a branch or element of the system

Harmonics

⇒ Parallel Resonance



⇒ Series Resonance

Harmônicos

⇒ Fontes de Harmônicos:

- Saturação do núcleo magnético de transformadores
- Corrente de energização dos transformadores
- Fornos elétricos a arco
- Pontes retificadoras trifásicas
- Computadores
- Aparelhos de TV
- Fornos de microondas
- Reatores eletrônicos e eletromagnéticos
- Controladores de iluminação
- Controladores de velocidade de motores (envolvem conversores de frequência)
- etc

Efeitos dos Harmônicos

- ⇒ **Perdas adicionais e aquecimento em máquinas elétricas:** aumento nas perdas no ferro devido às correntes parasitas induzidas.
- ⇒ **Sobretensões devido a ressonâncias:** no caso da instalação de bancos de capacitores para correção do fator de potência em instalações com cargas não lineares.
- ⇒ **Interferências:**
 - Circuitos telefônicos e de proteção e controle que operam em uma faixa de 100 Hz a 4 kHz
 - Atuação indevida de disjuntores termomagnéticos: eles possuem um disparador térmico sensível ao aquecimento. Como eles são ajustados considerando o aquecimento causado pela corrente fundamental, correntes harmônicas elevadas podem aquecer o circuito, causando sua atuação desnecessária.
- ⇒ **Aumento da corrente de neutro:** os harmônicos de 3ª ordem e seus múltiplos estão em fase e assim, as correntes com essas harmônicas se somam no neutro de sistemas trifásicos, causando sobreaquecimento.

Efeitos dos Harmônicos

⇒ **Necessidade de sobredimensionamento de transformadores e suas perdas:** ocorre quando o transformador opera em um ambiente cujas tensões possuem conteúdo fortemente harmônico. Conforme já mencionado, ocorre uma elevação nas perdas no ferro.

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ Cargas eletrônicas utilizadas nas residências são potenciais causadoras de distorções harmônicas severas nos sistemas de distribuição de energia elétrica, pois:

- Embora a contribuição individual seja insignificante,
- A **contribuição harmônica coletiva** dessas cargas tem mostrado, em alguns casos, impactos negativos significantes, por exemplo:
 - ❑ Tensões de 3º harmônico têm se mostrado dominantes em muitos SDs
 - ❑ Tensões de 9º harmônico estão associadas à interferência telefônica
 - ❑ Medidores e outros equipamentos de instrumentação têm sido afetados por componentes harmônicos.

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ Antes:

- Cargas Industriais
- Fontes harmônicas concentradas

⇒ Hoje:

- Cargas Residenciais
- Fontes harmônicas distribuídas por todo o sistema elétrico

⇒ O comportamento aleatório das cargas residenciais impõe dificuldades na análise dos efeitos coletivos dos mesmos.

⇒ **Então, como esses efeitos devem ser analisados?**

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ Solução proposta por:

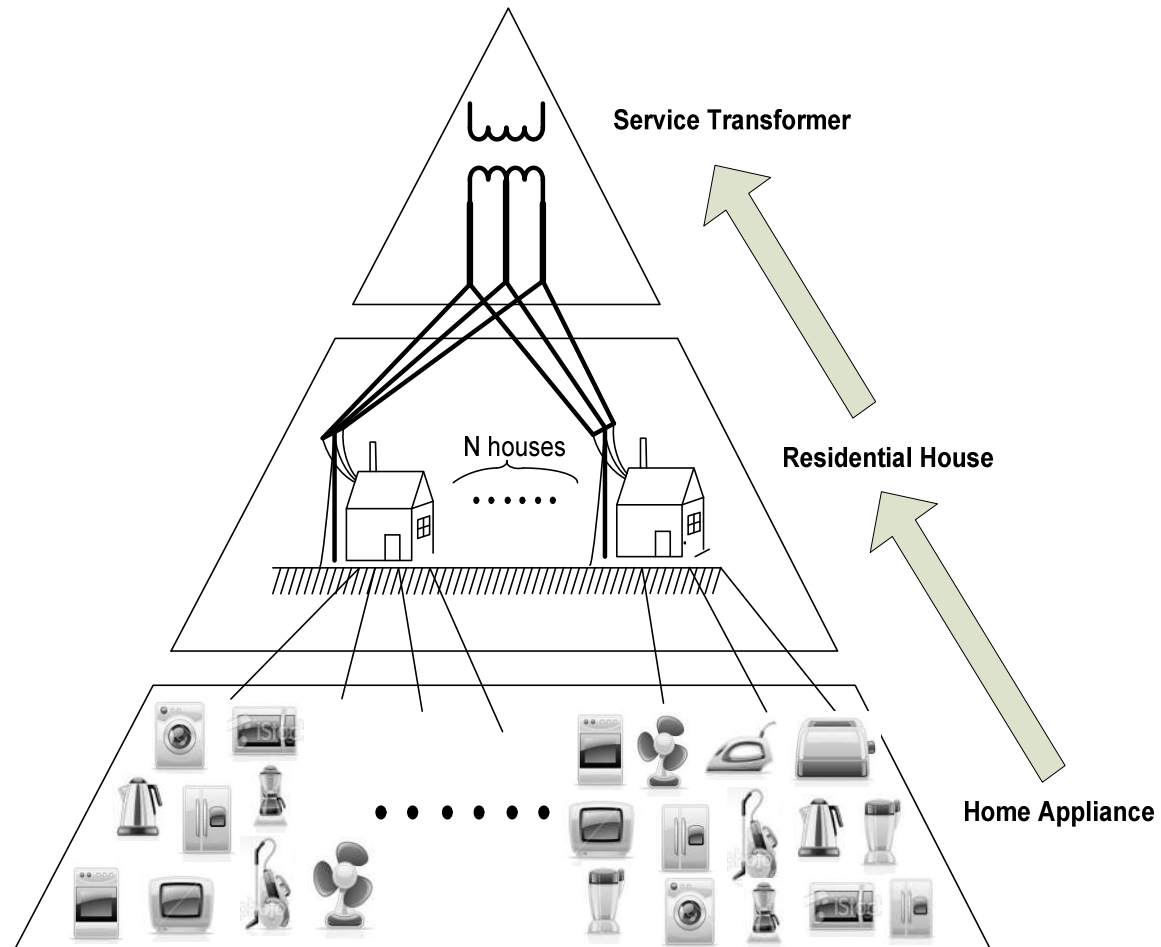
- Salles, D. *Metodologias para a Avaliação do Impacto Harmônico Coletivo de Cargas Residenciais em Modernos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), UNICAMP, junho 2012.

⇒ Ideia básica:

- ⇒ A aleatoriedade das cargas harmônicas nos sistemas de distribuição se deve, principalmente, ao estado das mesmas (**ligadas / desligadas**);
- ⇒ Quando essas cargas estão ligadas, seu comportamento harmônico é conhecido, portanto o comportamento é determinístico;
- ⇒ Assim, a análise das cargas harmônicas residenciais distribuídas é baseada na modelagem estocástica dos estados **ligado e desligado**;
- ⇒ Uma vez concluída a modelagem estocástica dos estados, o problema pode ser resolvido por um programa de cálculo de **fluxo de carga harmônico** convencional.

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ Estratégia *Bottom Up*:



Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

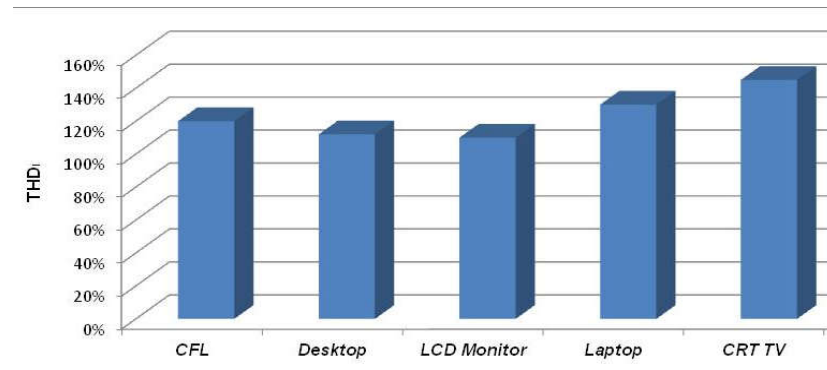
⇒ **Três aspectos a serem considerados em relação às fontes de harmônicos:**

- ⇒ **Modelo elétrico:** modelo usado para analisar o nível de penetração de harmônicos
- ⇒ **Modelo futuro:** modelo para prever o crescimento das cargas harmônicas no setor residencial
- ⇒ **Modelo do estado:** modelo para considerar o estado **Ligado/Desligado** das cargas residenciais

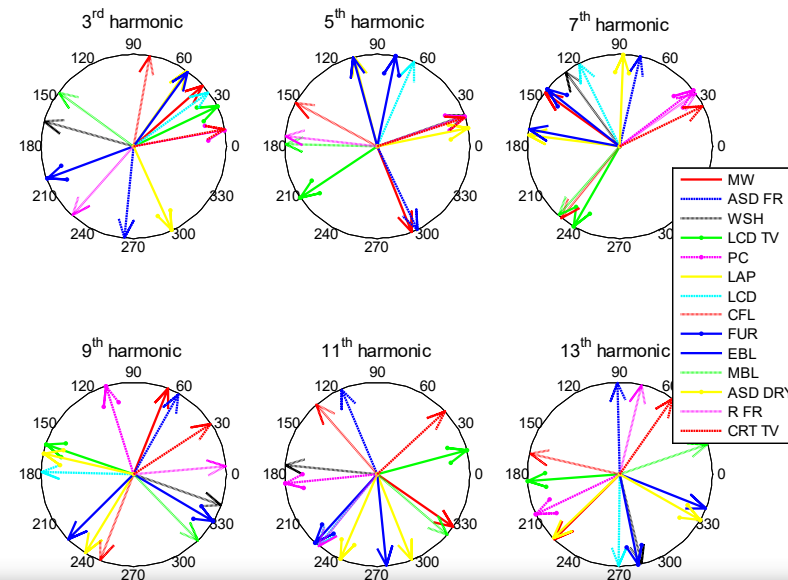
Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ **Modelo Elétrico:** caracterização do espectro harmônico dos equipamentos.

⇒ **Distorção harmônica total de corrente**



⇒ **Ângulos das correntes harmônicas**



Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ **Modelo Elétrico**: cargas lineares e não lineares.

⇒ Em um ambiente com elevado nível de distorção harmônica, mesmo cargas resistivas apresentarão forma de onda de corrente distorcida em função das cargas não lineares existentes

⇒ Logo, é necessário classificar corretamente as cargas residenciais quanto à linearidade para proceder à modelagem matemática.

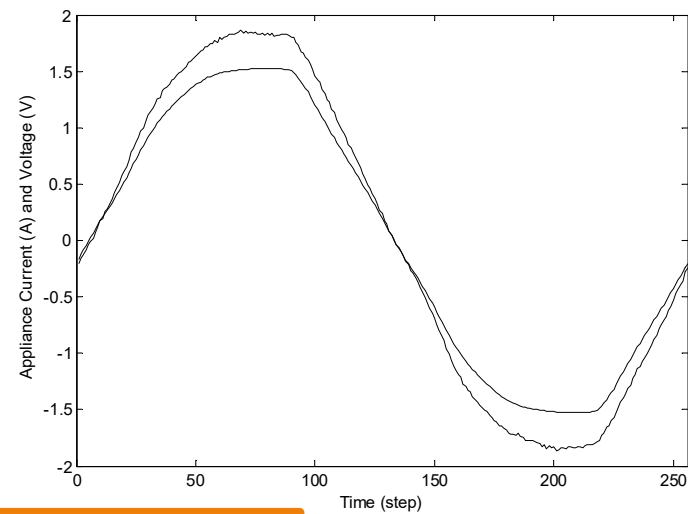
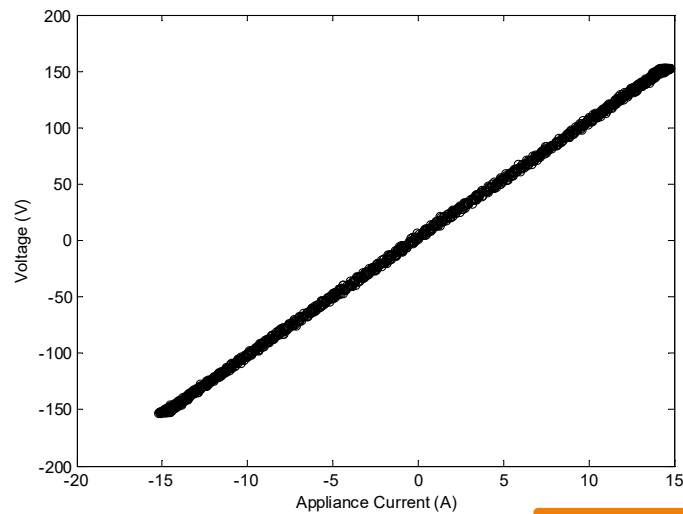
⇒ Esta classificação foi feita analisando-se a correlação entre os valores instantâneos de tensão e de corrente por meio de medições em laboratório.

⇒ Os resultados são apresentados em seguida.

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ **Modelo Elétrico:** cargas lineares e não lineares.

⇒ **Cargas lineares:** a relação $V \times I$ origina uma reta ou uma elipse.

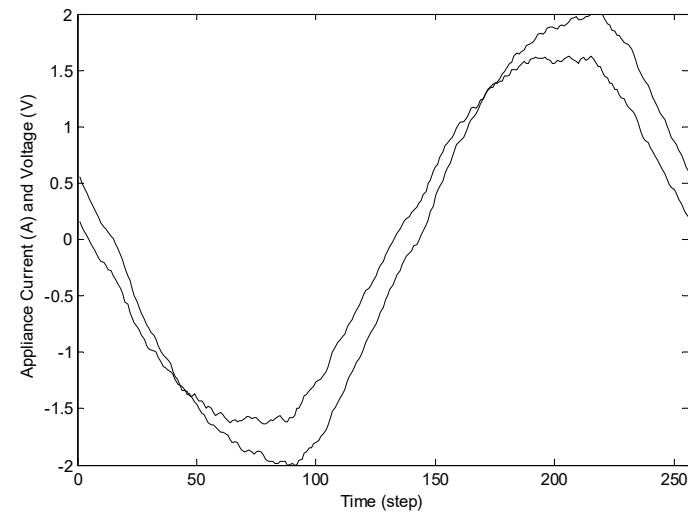
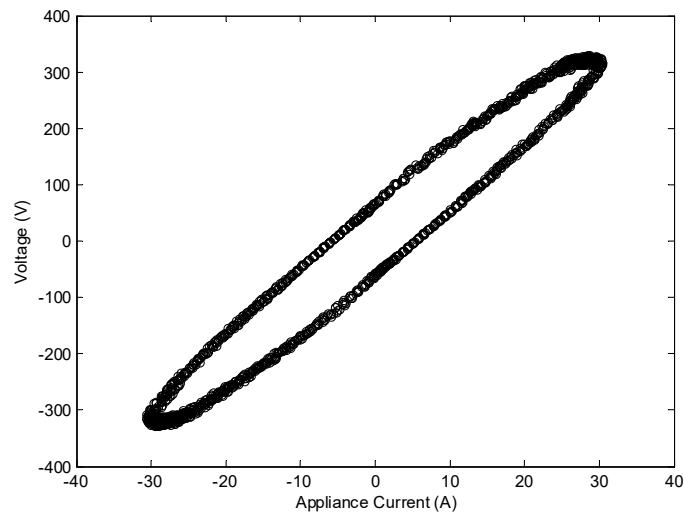


Grill

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ **Modelo Elétrico:** cargas lineares e não lineares.

⇒ **Cargas lineares:**

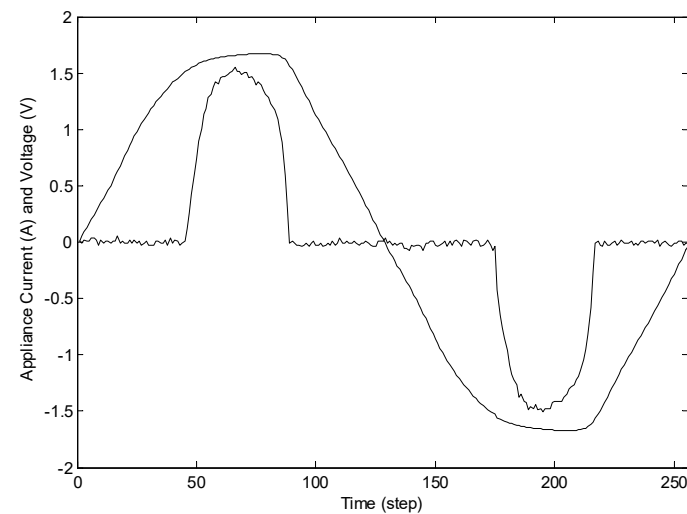
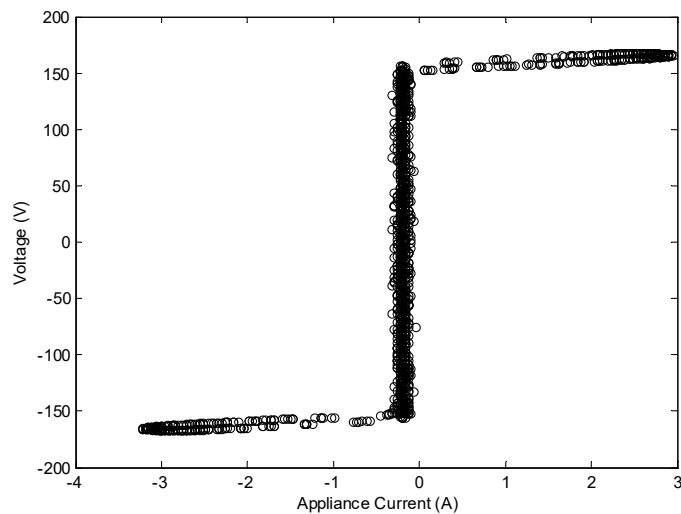


Secadora de roupas

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ **Modelo Elétrico:** cargas lineares e não lineares.

⇒ **Cargas não lineares:** a relação $V \times I$ não origina uma reta ou uma elipse.

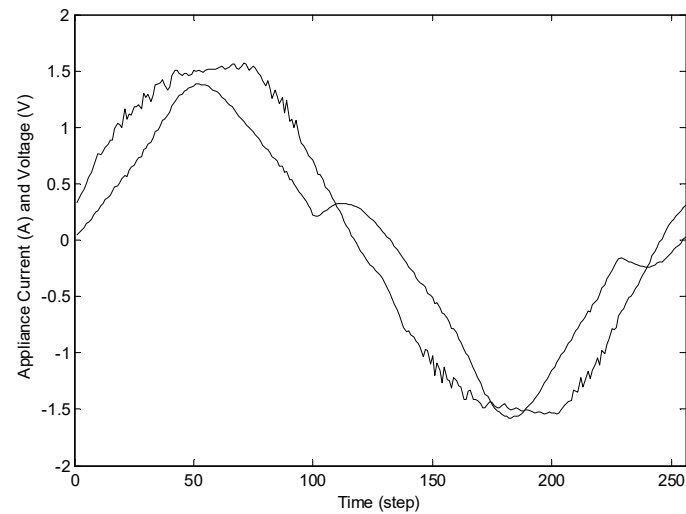
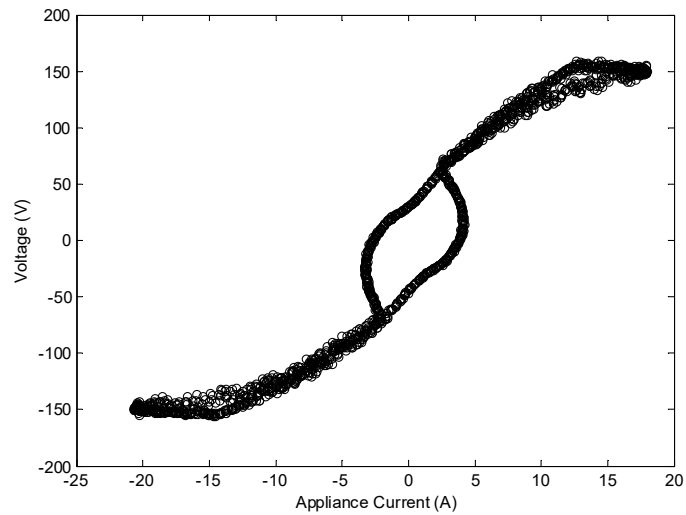


TV Convencional (tubo de raios catódicos)

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ **Modelo Elétrico:** cargas lineares e não lineares.

⇒ **Cargas não lineares:**



Forno de microondas

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ **Modelo Elétrico:** resultados da classificação das cargas

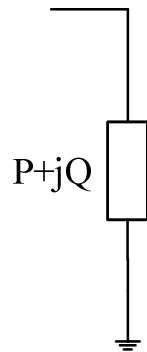
Appliance Name	Characteristic of Appliance
Compact Fluorescent Lamp	Non-linear
Electric-Ballast Fluorescent Lamp	Non-linear
Magnetic-Ballast Fluorescent Lamp	Linear
Incandescent Lamp	Linear
Desktop PC	Non-linear
LCD Computer Monitor	Non-linear
Laptop	Non-linear
LCD Television	Non-linear
CRT Television	Non-linear
Fridge	Non-linear
Freezer	Non-linear
Washer	Non-linear
Dryer	Linear
Electric Range	Linear

Electric Oven	Linear
Microwave Oven	Non-linear
Toaster	Linear
Coffee Maker	Linear
Griddle	Linear
Waffle Iron	Linear
Bread Maker	Non-linear
Blender	Non-linear
Food Processor	Non-linear
Printer	Non-linear
Copier	Non-linear
Electric Kettle	Linear
Furnace	Non-linear
Garage Door	Non-linear
Vacuum Cleaner	Non-linear

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

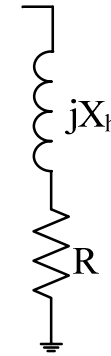
⇒ Modelo Elétrico:

⇒ Cargas lineares



Modelo na frequência fundamental

P e Q são medidos



Modelo na frequência harmônica

$$P + jQ = V_1 \times \text{conj}(I_1)$$

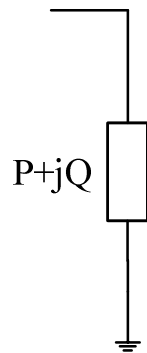
$$R = \frac{V_1^2}{P}$$

$$X_h = h \times \frac{V_1^2}{Q}$$

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

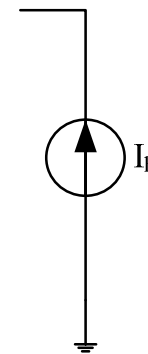
⇒ Modelo Elétrico:

⇒ Cargas não lineares



Modelo na frequência fundamental

P e Q são medidos



Modelo na frequência harmônica

Executa-se fluxo de carga na frequência fundamental para determinar I_1 . Após isso:

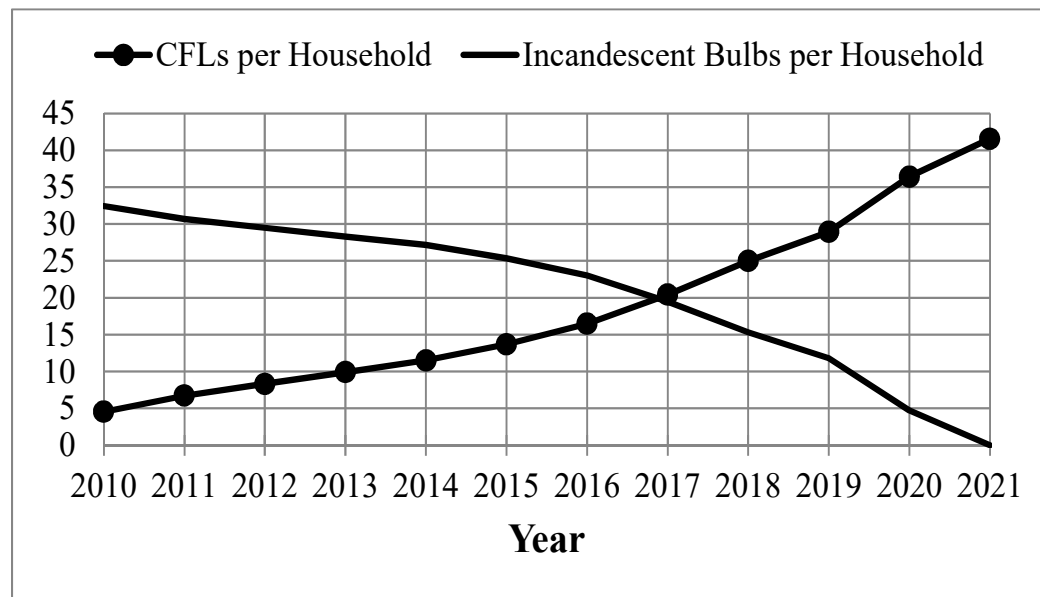
$$I_h = I_1 \times \frac{I_{h-spectrum}}{I_{1-spectrum}}$$

$$\theta_h = \theta_{h-spectrum} + h \times (\theta_1 - \theta_{h-spectrum})$$

O subscrito “*spectrum*” refere-se à medição do espectro harmônico da carga

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

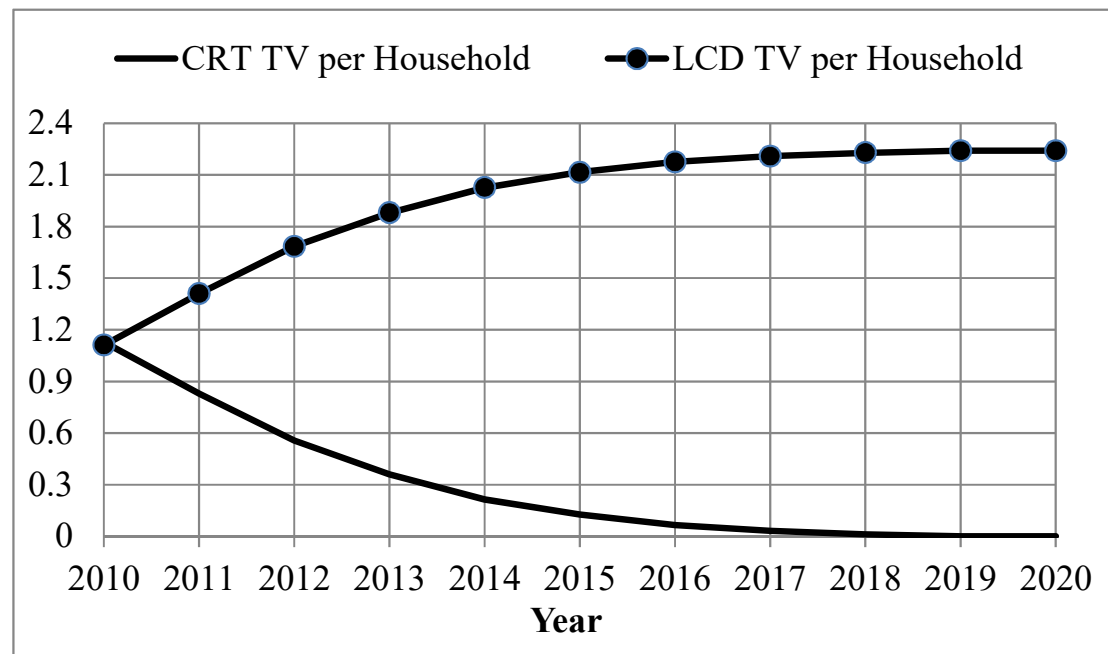
⇒ **Modelo Futuro:** evolução das cargas não lineares. As informações apresentadas a seguir referem-se a dados históricos e baseados em pesquisas realizadas nos EUA e Canadá.



Lâmpadas compactas fluorescentes (CFL)
x
Lâmpadas incandescentes

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

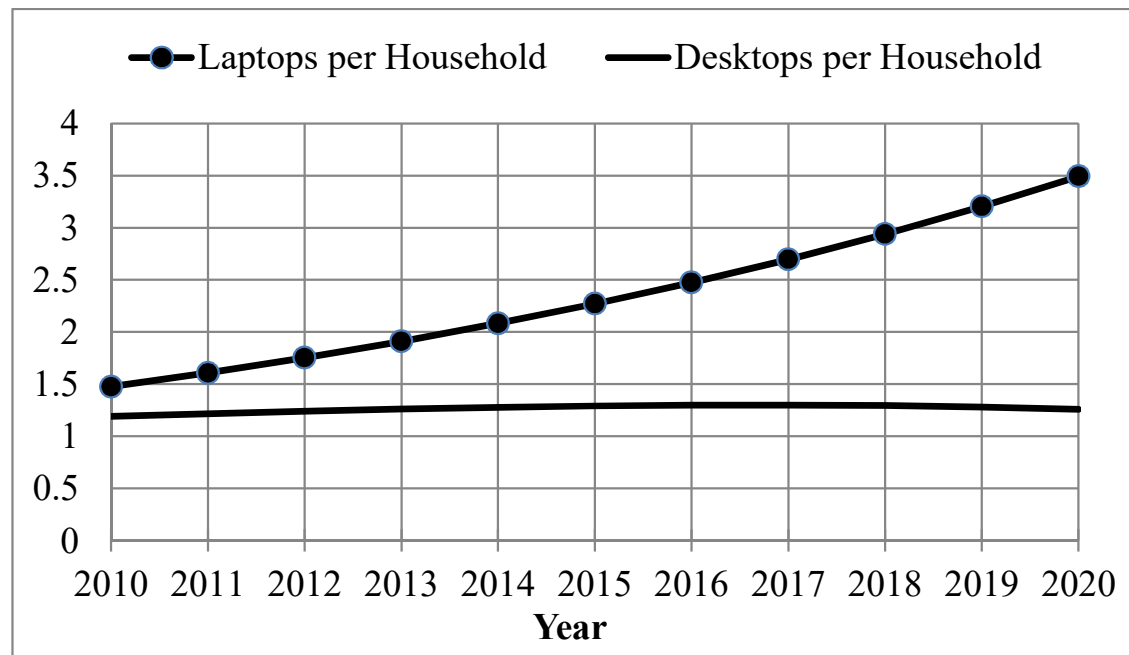
⇒ Modelo Futuro:



TVs LCD x TVs CRT

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

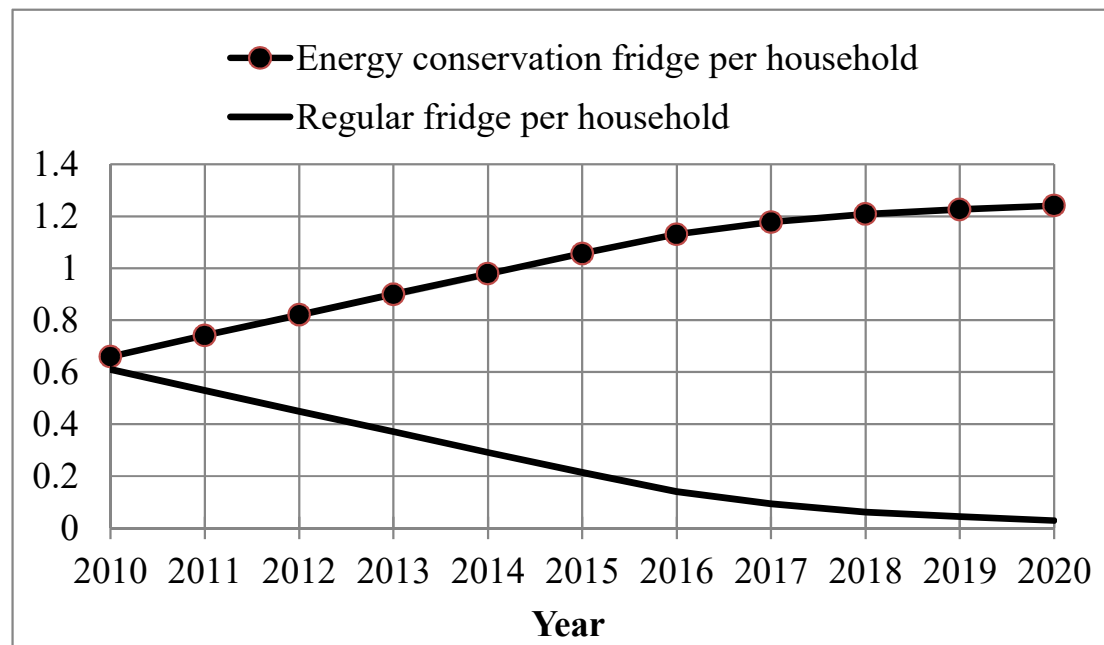
⇒ Modelo Futuro:



Laptops e Desktops

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ Modelo Futuro:



Refrigeradores comuns
x
Refrigeradores eficientes (motores de
velocidade variável)**

** THD_i >= 136%

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ Modelo do estado: *abordagem estocástica para modelar o perfil harmônico de residências.*

⇒ Baseia-se nos seguintes fatores:

⇒ Quando as cargas estão ligadas. Este fator pode ser estimado pelo ***Perfil de Probabilidade de Uso Diário da Carga (Daily Time of Use Probability Profiles)***

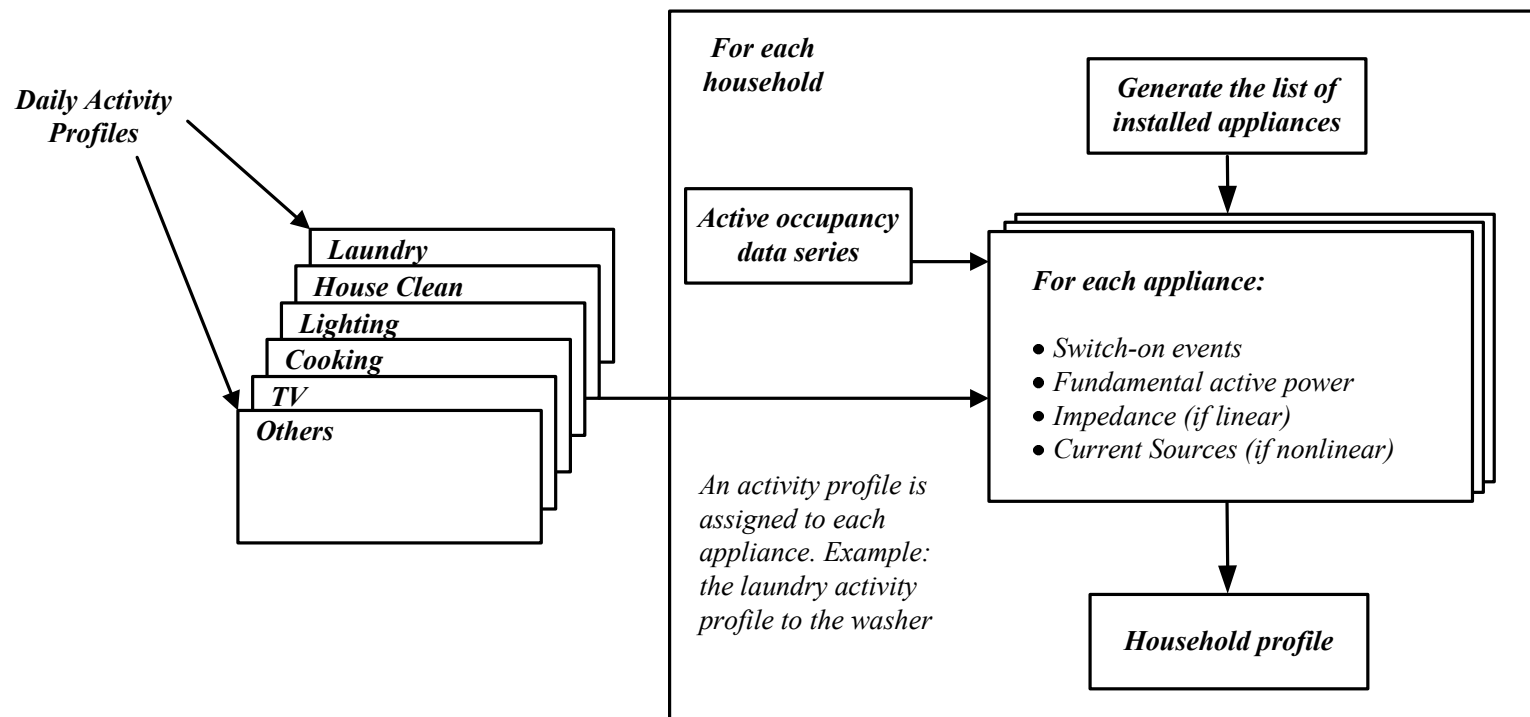
⇒ Por quanto tempo a carga permanecerá ligada (***ciclo de operação***).

⇒ Qual o impacto dos hábitos dos moradores da casa.

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ Modelo do estado: abordagem estocástica para modelar o perfil harmônico de residências.

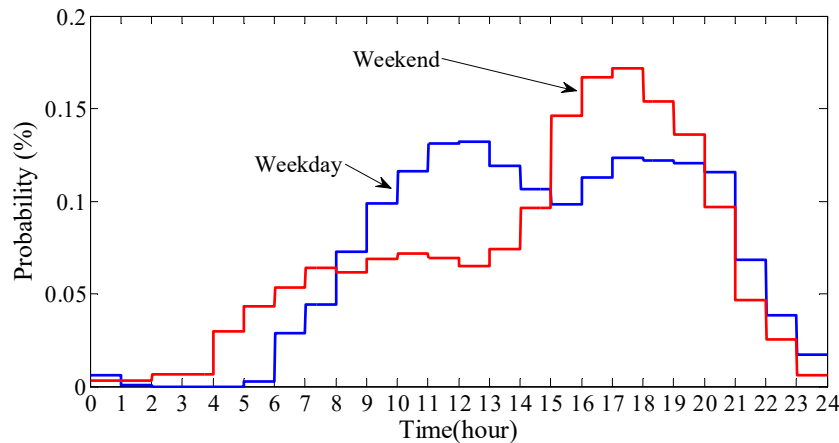
⇒ Apresenta-se a seguir a estrutura básica do método para estimar o perfil harmônico de residências



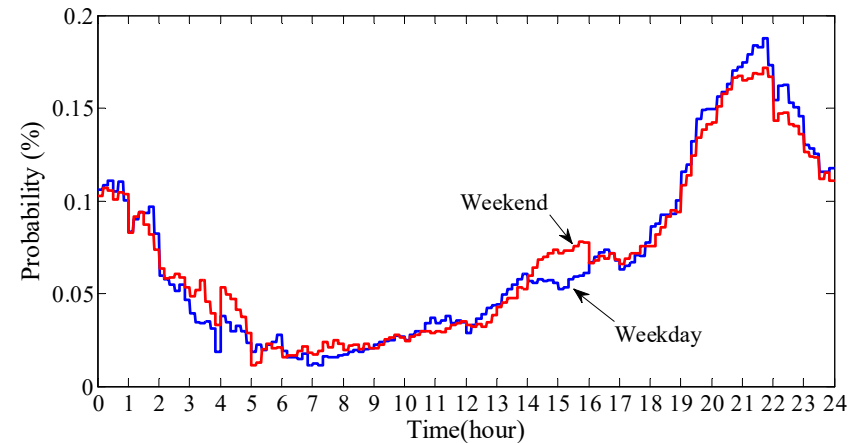
Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ Modelo do estado: abordagem estocástica para modelar o perfil harmônico de residências.

⇒ O **Perfil de Probabilidade de Uso Diário da Carga** deve ser obtido para cada tipo de atividade. Alguns exemplos seguem abaixo:



Uso do Fogão



Uso da TV

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ Modelo do estado: abordagem estocástica para modelar o perfil harmônico de residências.

⇒ *Ciclo de Operação da Carga*

Appliance	Power (W)	Cycle Duration (min)	Cycles per year	Annual Consumption (kWh/year)
Dishwasher	467	30 to 45	200 (low) 322 (medium) 418 (high)	58 (low) 94 (medium) 122 (high)
Washer	505	30 (two 15-minute cycles)	242 (low) 392 (medium) 601 (high)	61 (low) 99 (medium) 152 (high)
Dryer	4115	30 to 60	192 (low) 416 (medium) 640 (high)	593 (low) 1284 (medium) 1976 (high)
Range	1600	15 to 70	678 (low) 678 (medium) 950 (high)	769 (low) 769 (medium) 1077 (high)
Refrigerator	265 (peak)	----	----	801 (low), 801 (medium) 1602 (high: 2 fridges)
Freezer	202 (peak) 263 (peak)	----	----	0 (low), 614 (medium) 798 (high)

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ Modelo do estado: *abordagem estocástica para modelar o perfil harmônico de residências.*

⇒ *Tamanho e padrão de ocupação da residência*

- ❑ Para considerar diferentes residências, introduz-se o fator K que é a razão do número de moradores de uma residência sobre o número médio de moradores das residências analisadas.
- ❑ O padrão de ocupação é afetado por dois fatores principais:
 - ❑ O horário em que a primeira pessoa acorda e em que a última pessoa vai dormir
 - ❑ O tempo de inatividade da residência devido ao horário de trabalho dos ocupantes.

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ Modelo do estado: *abordagem estocástica para modelar o perfil harmônico de residências.*

⇒ *Tamanho e padrão de ocupação da residência*

□ Exemplo de padrão de ocupação da residência

Type of Day	No.	Work Type	Time of Waking up	Working Time	Time of Going to Bed
Weekday	1	Full-time	6:00 - 7:30	8:00 - 17:00	22:00 - 00:00
	2	Part-time Morning	6:00 - 7:30	8:00 - 12:00	22:00 - 00:00
	3	Part-time Afternoon	6:00 - 8:00	13:00 - 17:00	22:00 - 00:00
	4	Not Working	6:00 - 8:00	N/A	22:00 - 00:00
Weekend	5	N/A	7:00 - 9:00	N/A	22:00 - 00:00

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

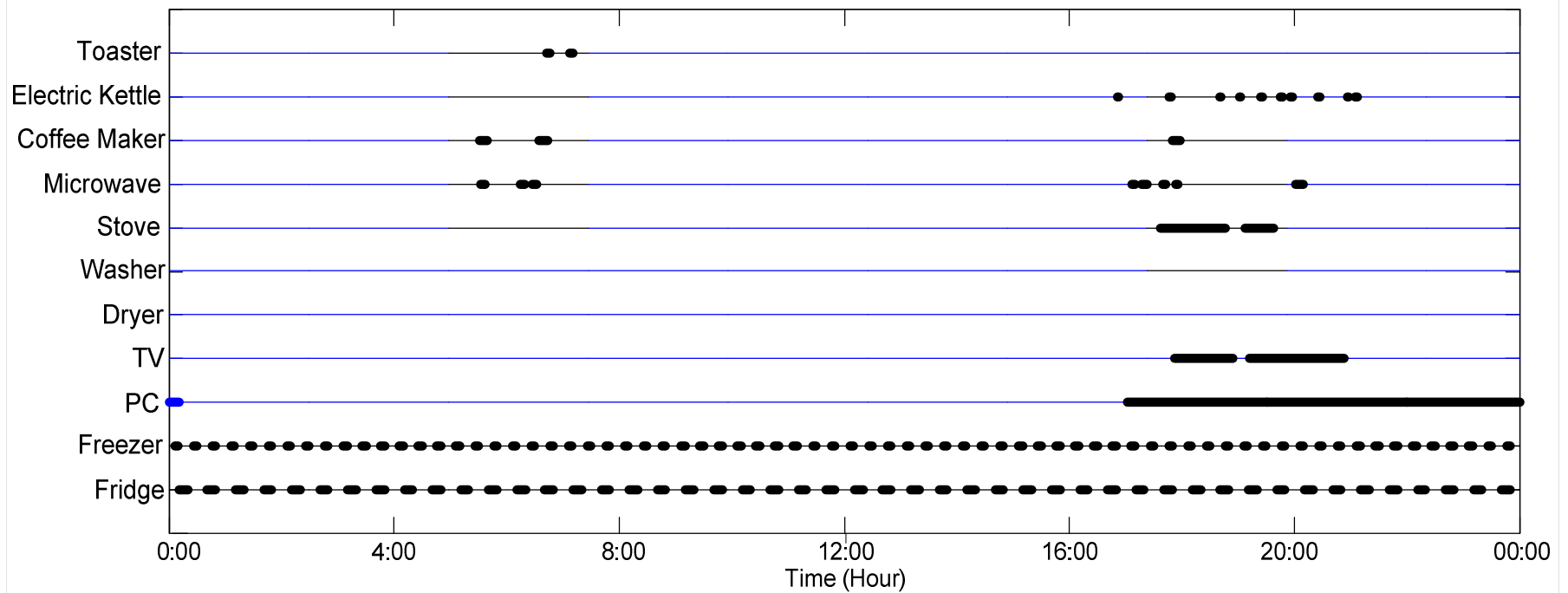
⇒ Método geral

⇒ Para cada carga da residência e para cada residência:

- ❑ Usando o perfil de probabilidade de uso diário da carga e o padrão de ocupação da casa, determine a probabilidade de ativação (P_r) desta carga para cada horário (instante de tempo ou tempo de simulação)
- ❑ Usando informações sobre o ciclo de operação da carga, determine o número de eventos de ativação da carga por dia (m)
- ❑ Corrija m para considerar o tamanho da residência: $m^* = m \times K$
- ❑ A probabilidade de uma carga residencial ser ligada em determinado instante de tempo t é igual a $P = P_r \times m^*$
- ❑ A carga estará considerada ligada se o valor de P for maior ou igual a um índice n , o qual é gerado aleatoriamente de acordo com uma distribuição normal.

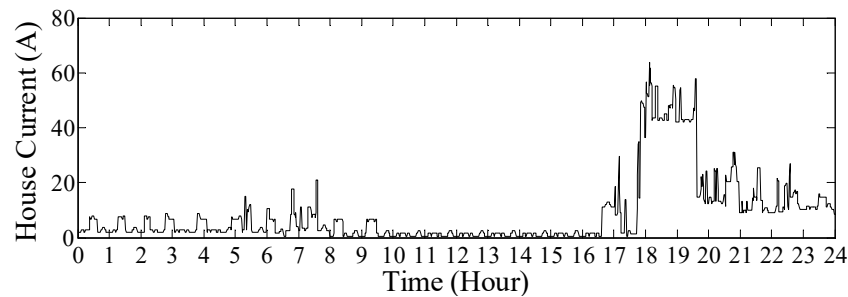
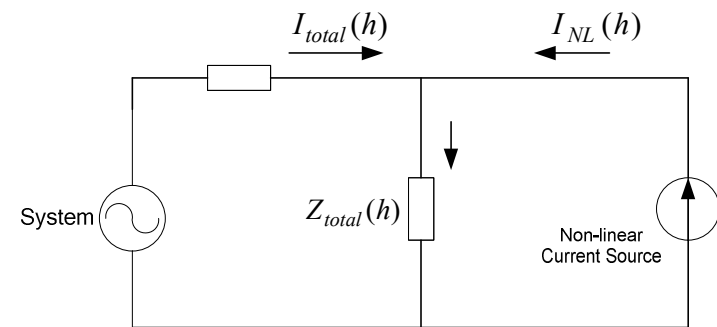
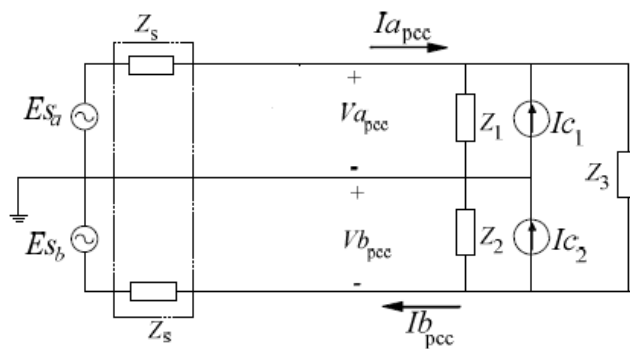
Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ Método geral: exemplo de resultado

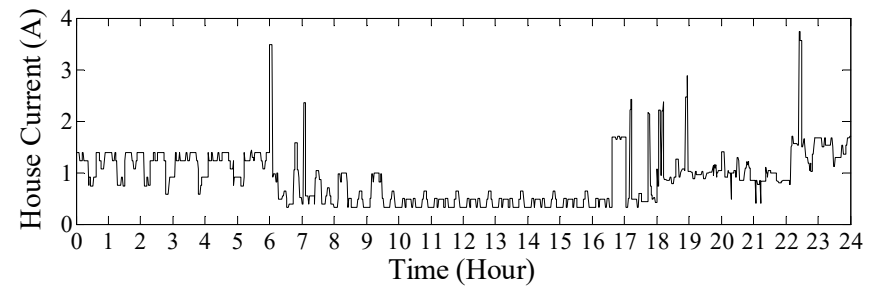


Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ Aplicação da modelagem para uma residência



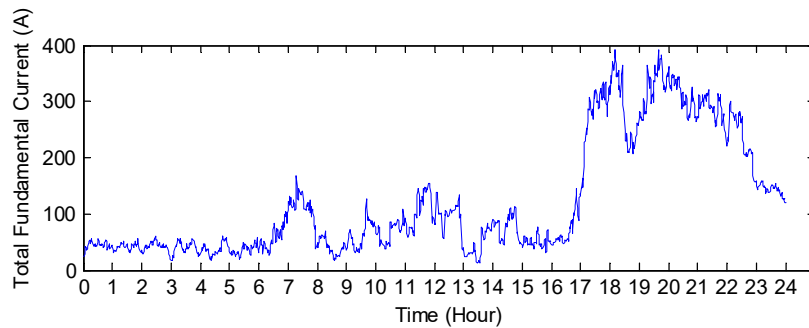
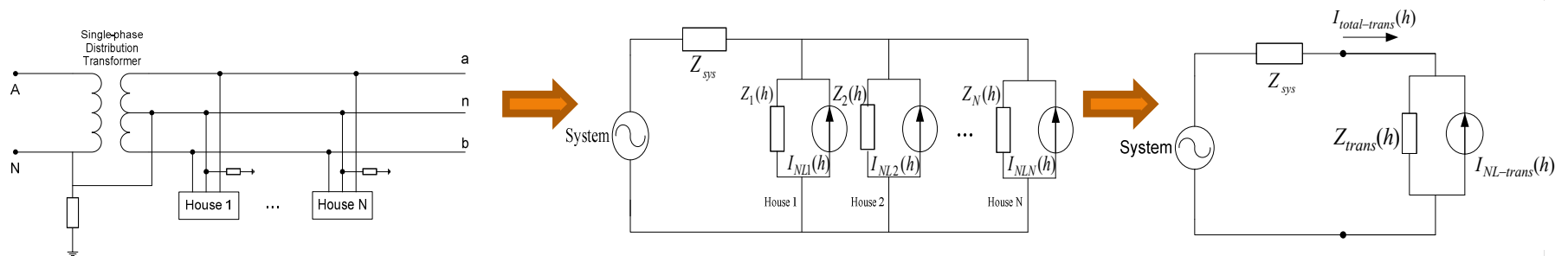
Corrente fundamental



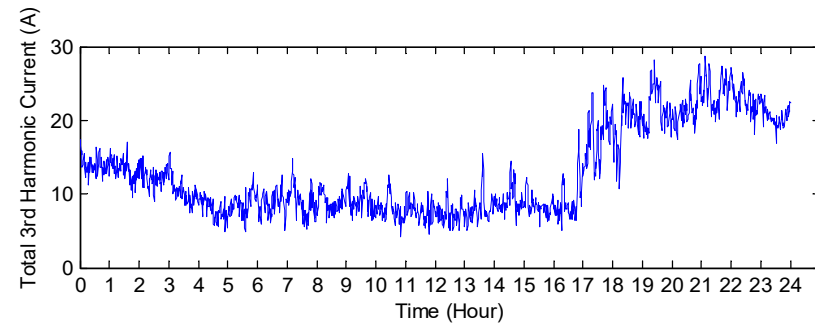
Corrente 3ª harmônica

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ Aplicação da modelagem para várias residências



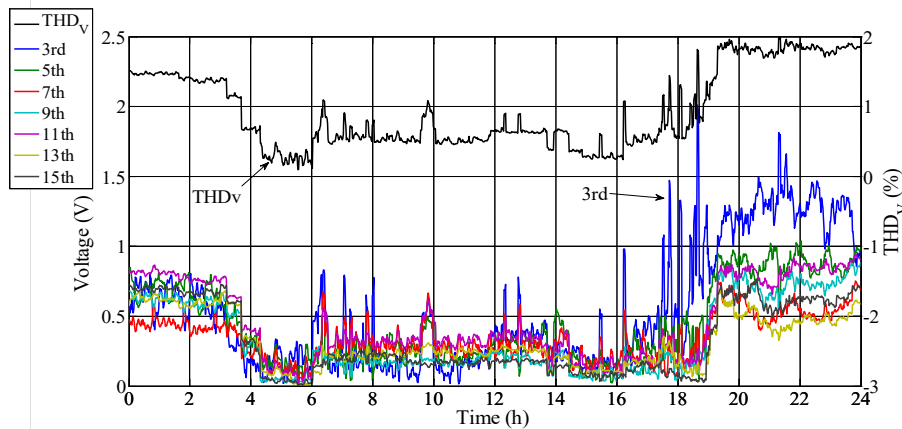
Corrente fundamental total



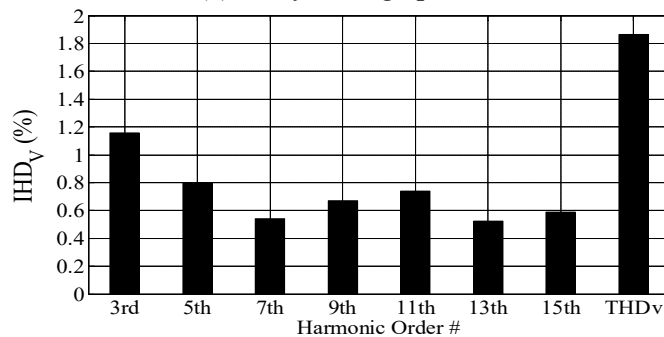
Corrente 3ª harmônica total

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

⇒ Exemplo de aplicação: 10 consumidores com padrões de consumo similares – análise feita na baixa tensão (120 V) -> emprego de programa de fluxo de carga harmônico

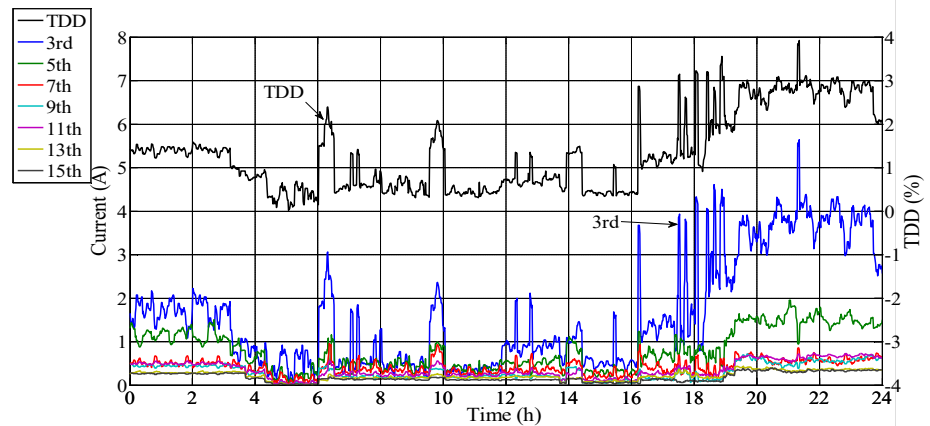


(a) Daily average profile

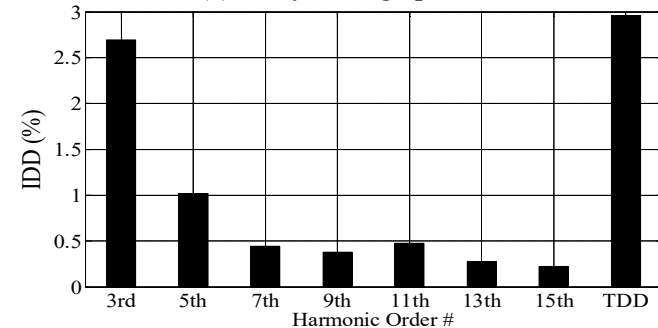


(b) 95% index

Tensões (Total)



(a) Daily average profile

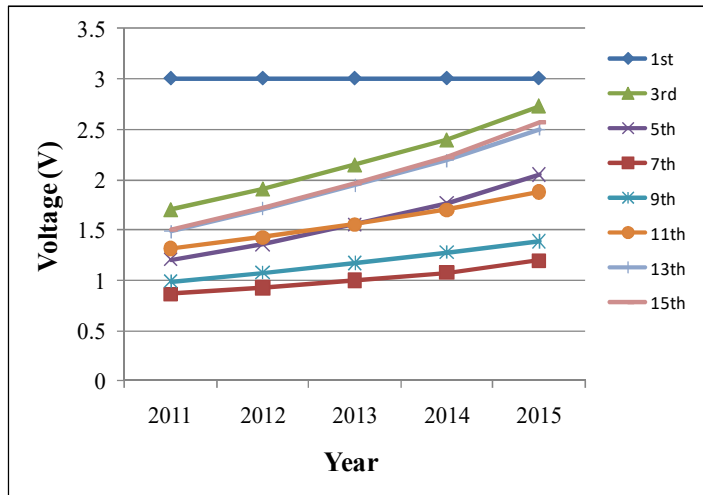


(b) 95% index

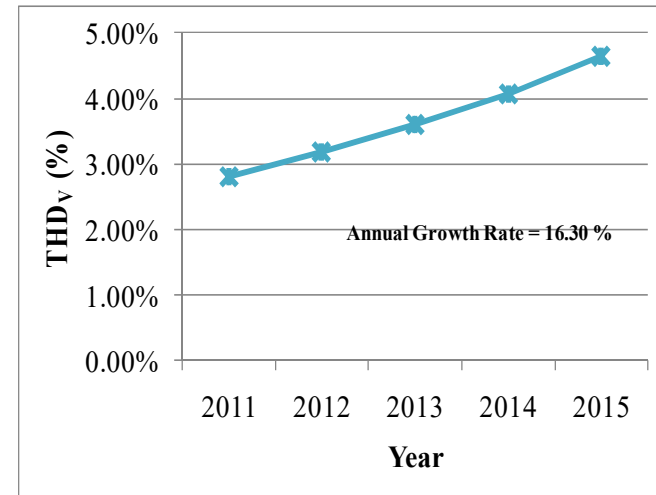
Correntes (Total)

Harmônicos em SDs – Novos Problemas e Desafios

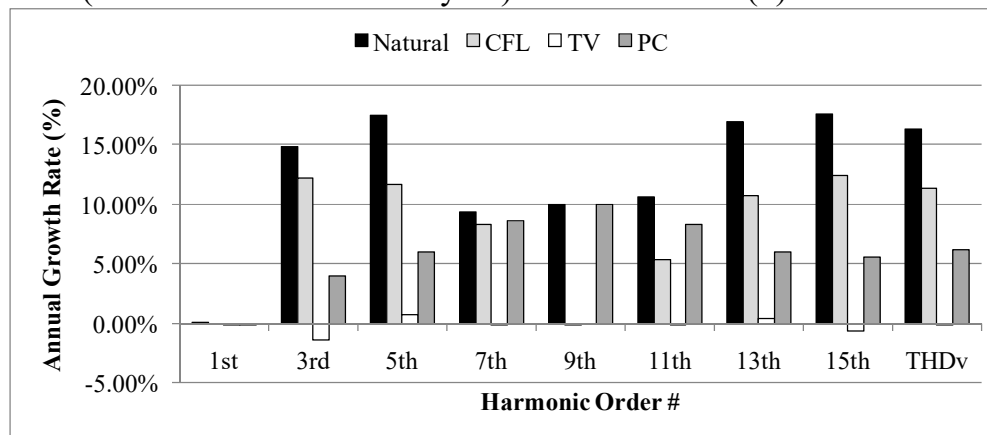
⇒ Exemplo de aplicação: evolução da carga



(a) Natural load evolution (fundamental is divided by 40)



(b) Natural load evolution



(c) Average annual growth rate

Trabalho

⇒ Pesquisa bibliográfica com apresentação oral sobre os seguintes temas

- ⇒ Monitoramento de harmônicos em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
- ⇒ Mitigação de harmônicos em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

⇒ Instruções:

- ⇒ Um tema para cada 2 alunos
- ⇒ Cada aluno pesquisará um artigo recente (inferior a 5 anos de publicação) para estudar e discutir os resultados em apresentação por slide. Alunos que ficaram com o mesmo tema, devem usar artigos diferentes.
- ⇒ Data da apresentação: dia 05/06.
- ⇒ As apresentações serão de 15 min.