

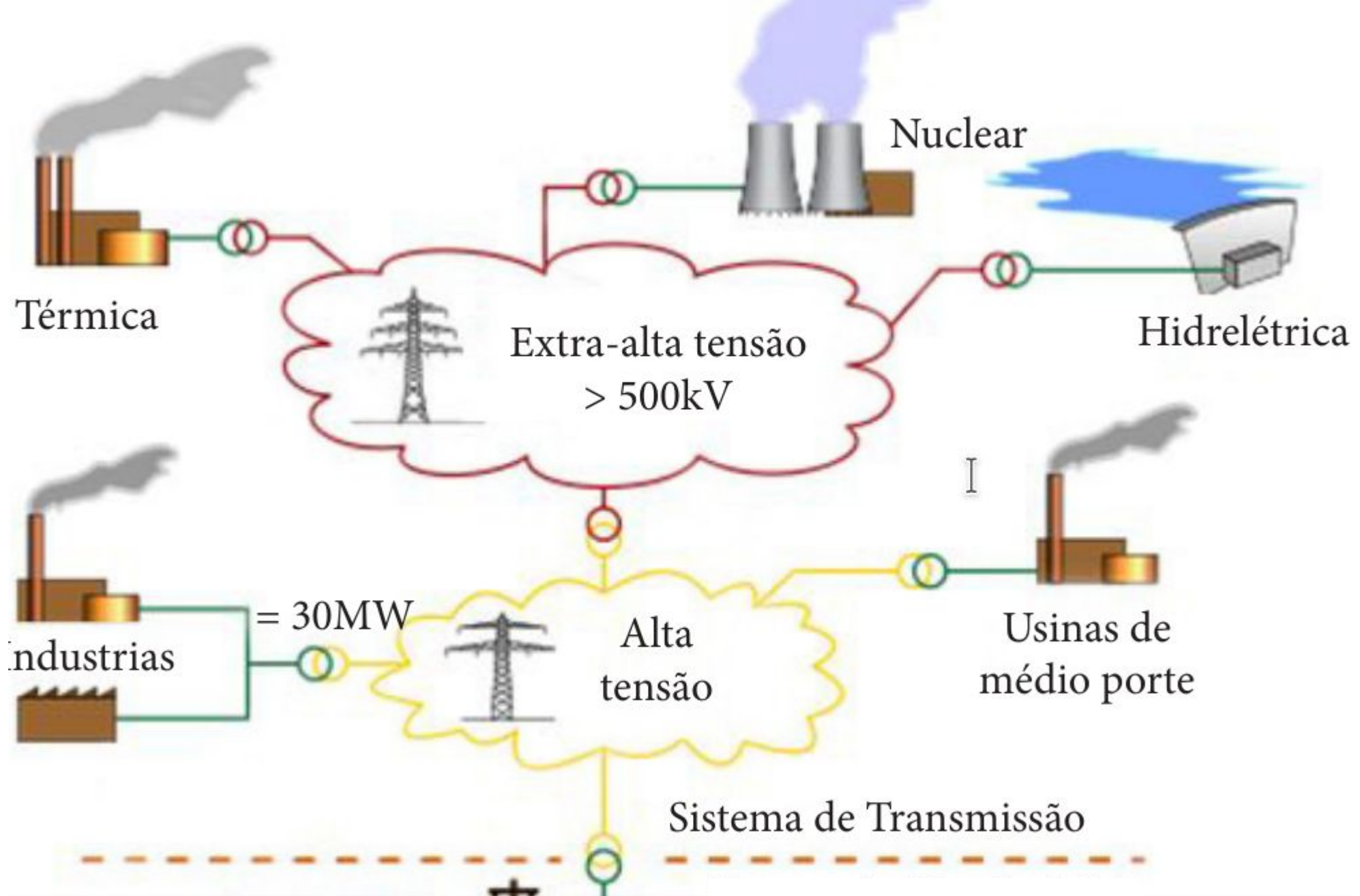
Modelo das redes de distribuição

Sistemas Elétricos de Potência II

Principais assuntos

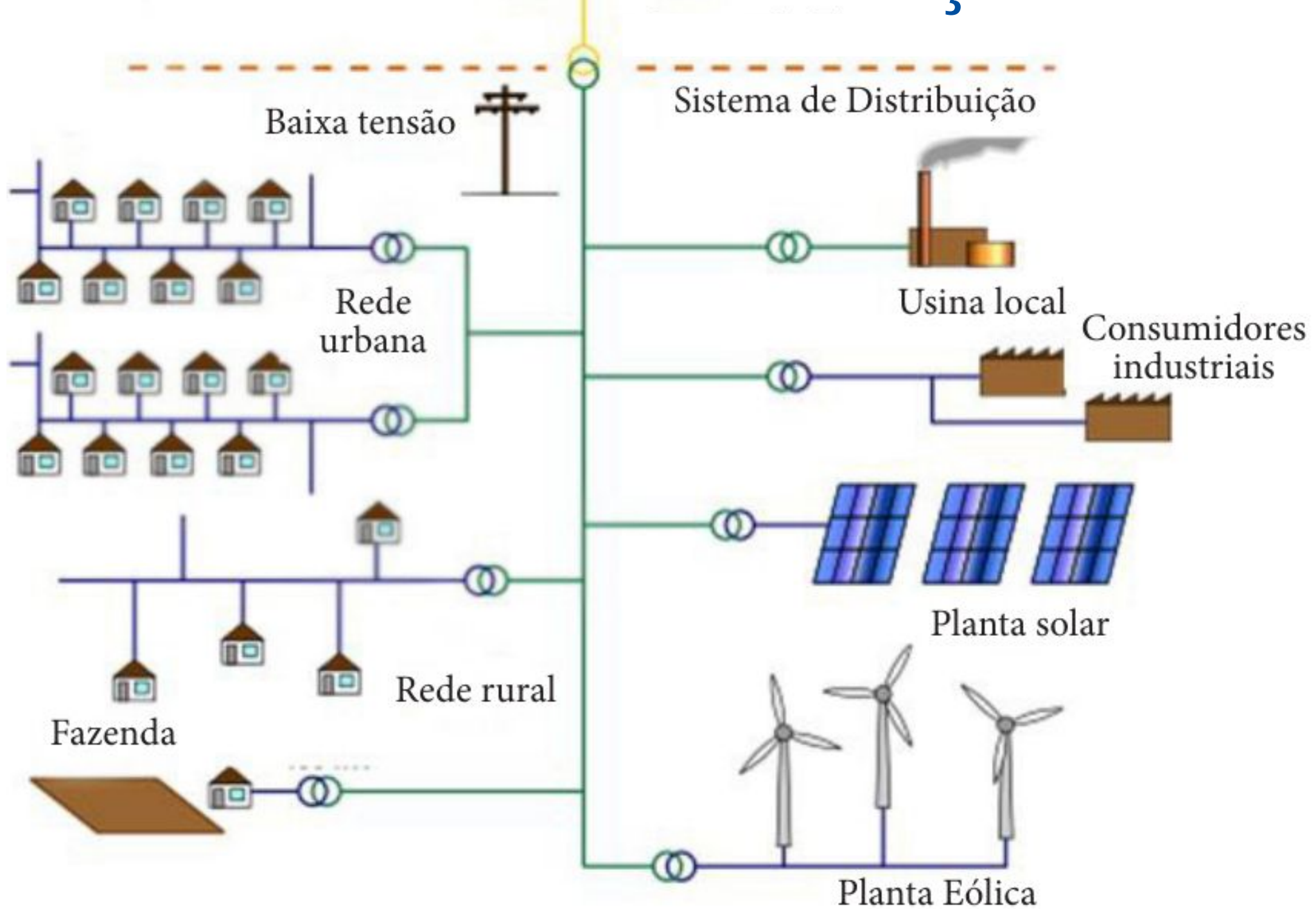
- Diferenças entre sistemas de
 - transmissão
 - distribuição
- Conceitos de redes de distribuição
 - primária
 - secundária
- Comportamento das cargas no sistema

Sistema de transmissão



(continua)

Sistema de distribuição



Níveis de tensão

Transmissão	750 kV - 500kV - 440kV
Subtransmissão	230kV - 138kV - 69kV
Distribuição primária	34,5kV - 13,8kV - 11,9kV
Distribuição secundária	380V - 220V - 127V - 115V - 110V

- ~ 69 kV
 - > transmissão
 - < distribuição
- ~ 34,5 a 138 kV
 - subtransmissão
 - normalmente responsabilidade da distribuidora

Redes de distribuição

- São parte do sistema de potência cuja função principal é atender os consumidores de energia, sejam esses consumidores indústrias, comércios ou residências
- O sistema tipicamente se inicia na subestação de distribuição que é alimentada por um ou mais linhas de transmissão ou subtransmissão, variando de concessionária para concessionária

- Cada uma das subestações de distribuição serve a um ou mais alimentadores
- Com raras exceções os alimentadores são do tipo radial
- Pequenos produtores de energia podem instalar a sua geração no nível dos sistemas de distribuição

- Qualquer pessoa pode instalar painéis fotovoltaicos em sua própria residência
 - caso não utilize toda a energia que produzir:
 - créditos de energia podem ser abatidos da conta
- Podem ser instaladas no nível da distribuição:
 - plantas de energia solar
 - eólica
 - pequenas usinas
- Conhecido como Geração Distribuída

Forma construtiva

- Tipo da rede de distribuição
 - aérea
 - subterrânea
- Aérea
 - Condutores nus ou com revestidos de uma camada de material plástico
 - Ficam apoiados em cruzetas de material sintético, ou isoladores em madeira
 - Sujeito a faltas, principalmente se passar por regiões que contam com a presença de muitas árvores e galhos

- Aérea compacta
 - Apresentam uma camada de isolação e podem assim ocupar menores espaços
- Aérea isolada
 - Constituída por condutores com isolação especial permitindo trançar os cabos, sendo um tipo de rede de custo alto

- Subterrâneas
 - Alta confiabilidade
 - Boa estética
 - Custo elevado: características dos componentes devem ser tal a configurar um bom isolamento e estanqueidade
 - Utilizado em regiões muito densas, ou
 - quando a instalação das redes aéreas é impossibilitada por algum motivo

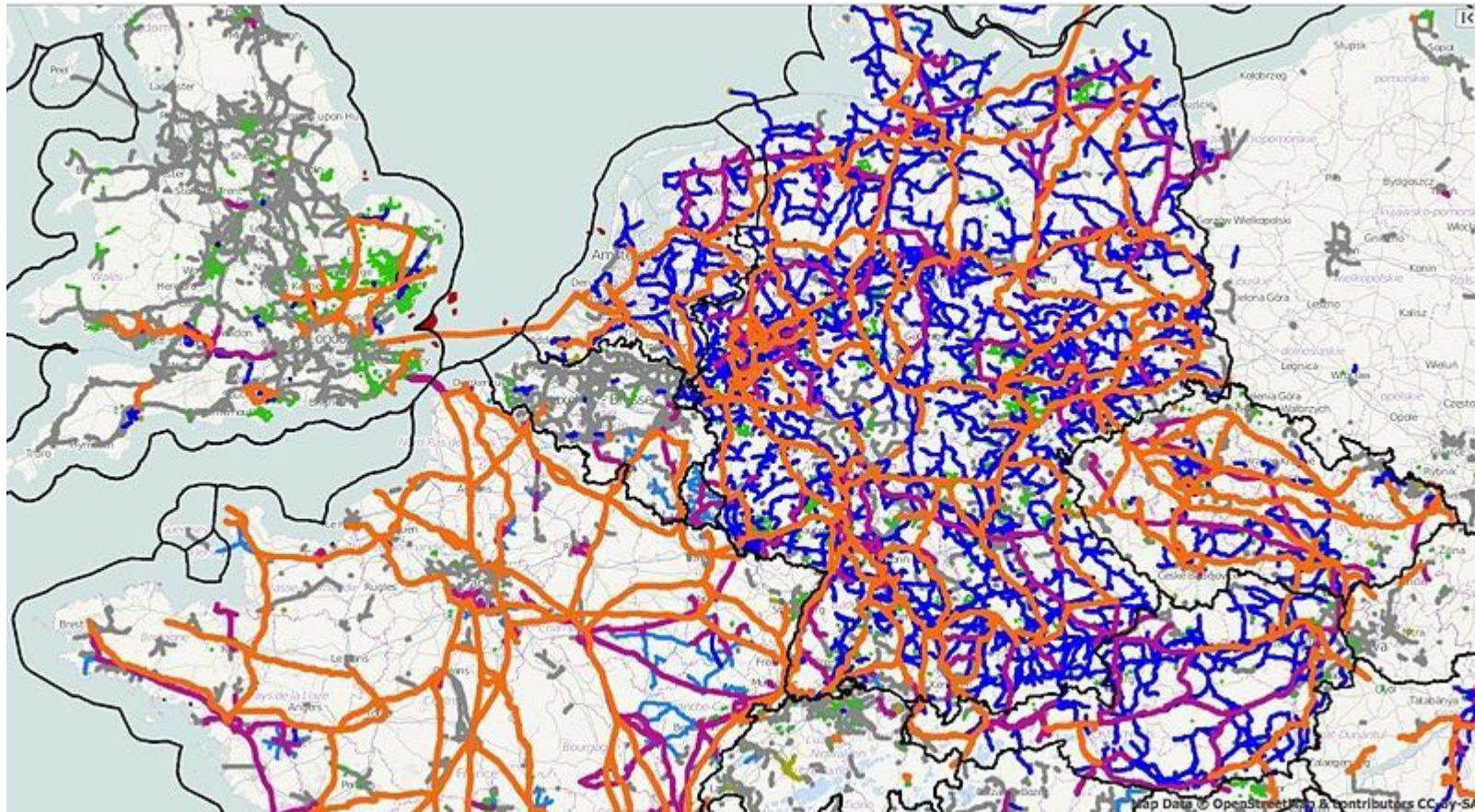
Métodos de solução até agora

- Transmissão
 - Newton-Raphson
 - Métodos desacoplados
 - Fluxo de carga CC
 - outros
- Distribuição
 - Não se pode simplesmente aplicar as técnicas de fluxo de carga desenvolvidas para os sistemas de transmissão utilizando os parâmetros das redes de transmissão

Distribuição

- Um dos entraves está relacionado à escalabilidade desse tipo de rede
- O número de barras a ser considerado nas redes de distribuição de energia é muitas vezes bem maior que o número de barras considerado no fluxo de carga dos sistemas de transmissão

Distribuição no norte da Europa



Laranja: > 380 kV

Azul: < 200 kV

Verde: < 50 kV

Parâmetros das linhas

- Sistemas de transmissão
 - Baixos valores de resistência
 - Capacitâncias das linhas são relevantes
- Linhas de distribuição
 - Resistências dos cabos passam a ser relevantes para o cálculo de fluxo de carga
 - Não pode ser usado: método desacoplado
 - Valores baixos de capacitância
 - Pode ser usado o modelo de linhas curtas com uma impedância série

- Distribuição
 - Maiores quedas de tensão ao longo do alimentador
 - Método de Newton demora um pouco mais para convergir
 - Deve considerar a assimetria dos parâmetros elétricos
 - Deve considerar o desequilíbrio das cargas

Distribuição - diferenças

- Escalabilidade
- Relação X/R das linhas
- Baixa capacitância das linhas
- Desbalanço dos parâmetros
 - Linhas
 - Cargas
- Esses fatores influenciam no desempenho dos algoritmos de fluxo de carga aplicados nos sistemas

Distribuição dividida em 5 partes

- Subtransmissão
- Subestação de distribuição
- Sistema de distribuição primário
- Sistema de distribuição secundário
- Consumidores

Subtransmissão

- Interconexão entre os sistemas de transmissão e distribuição
- Geralmente tensões consideradas como média tensão (entre 69 kV e 138 kV)
- Compartilha algumas características intermediárias entre os sistemas de distribuição e transmissão

Subtransmissão

- Em comum com o sistema de distribuição:
 - certo equilíbrio das cargas
 - parâmetros das linhas
- Topologia:
 - radial
 - radial com recurso
 - anel ou malhada

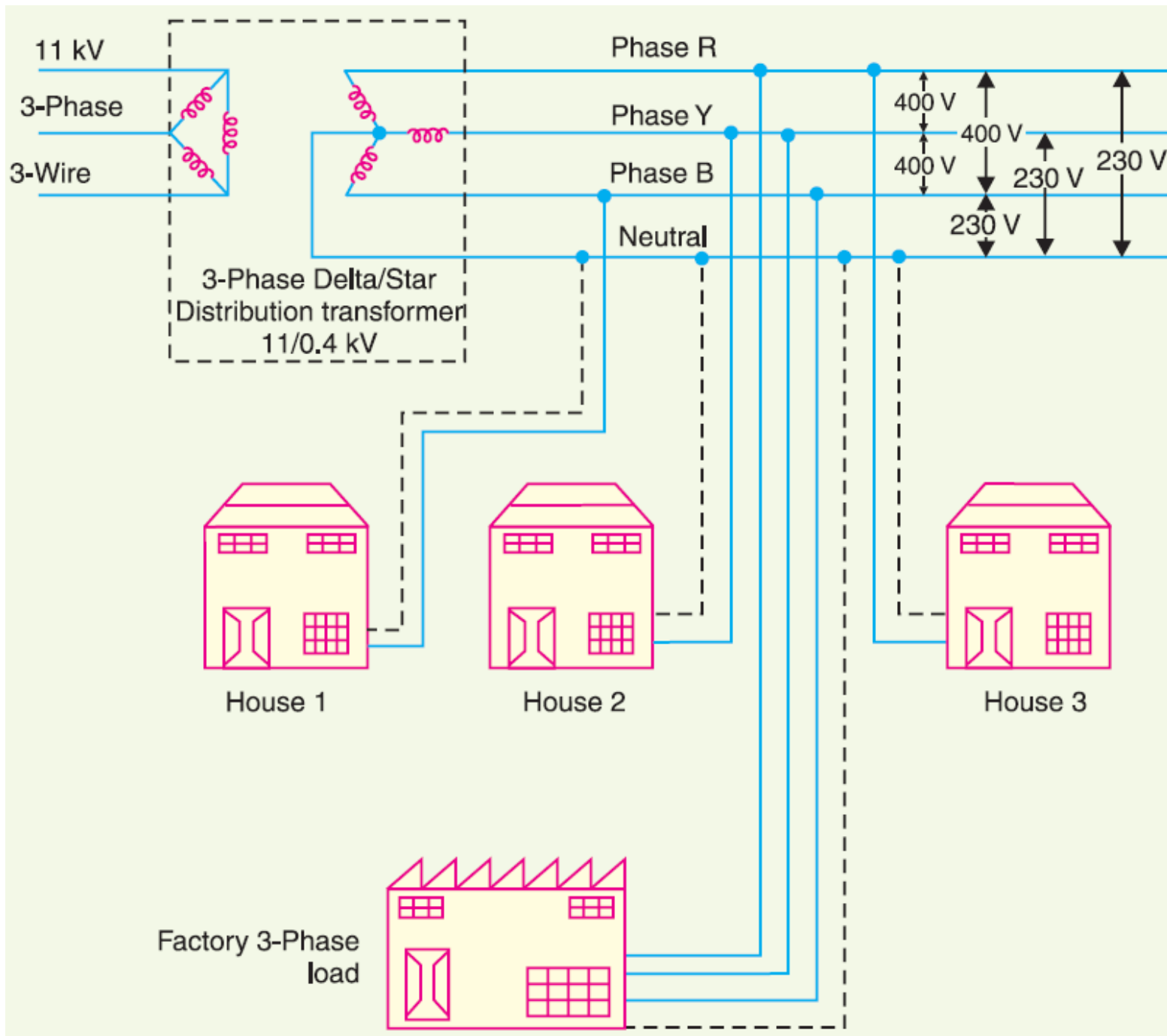
Requisitos atendimento consumidor

- **Continuidade**: todos os consumidores atendidos e uma geração igual à carga demandada
- **Qualidade**: implica respeitar os padrões aceitáveis e sujeitos a variações mínimas de tensão e frequência
- **Economia**: a demanda de energia seja suprida respeitando os dois requisitos anteriores e com o menor custo

Subestações de distribuição

- Ponto de interconexão entre os sistemas de transmissão e distribuição
- Arranjo de barras e equipamentos de proteção e medição
 - Monitorar o fluxo de energia e níveis de tensão entregues ao sistema de distribuição primário
- Transformadores abaixadores (dependendo da concessionária)
 - delta-estrela aterrado
 - estrela-delta

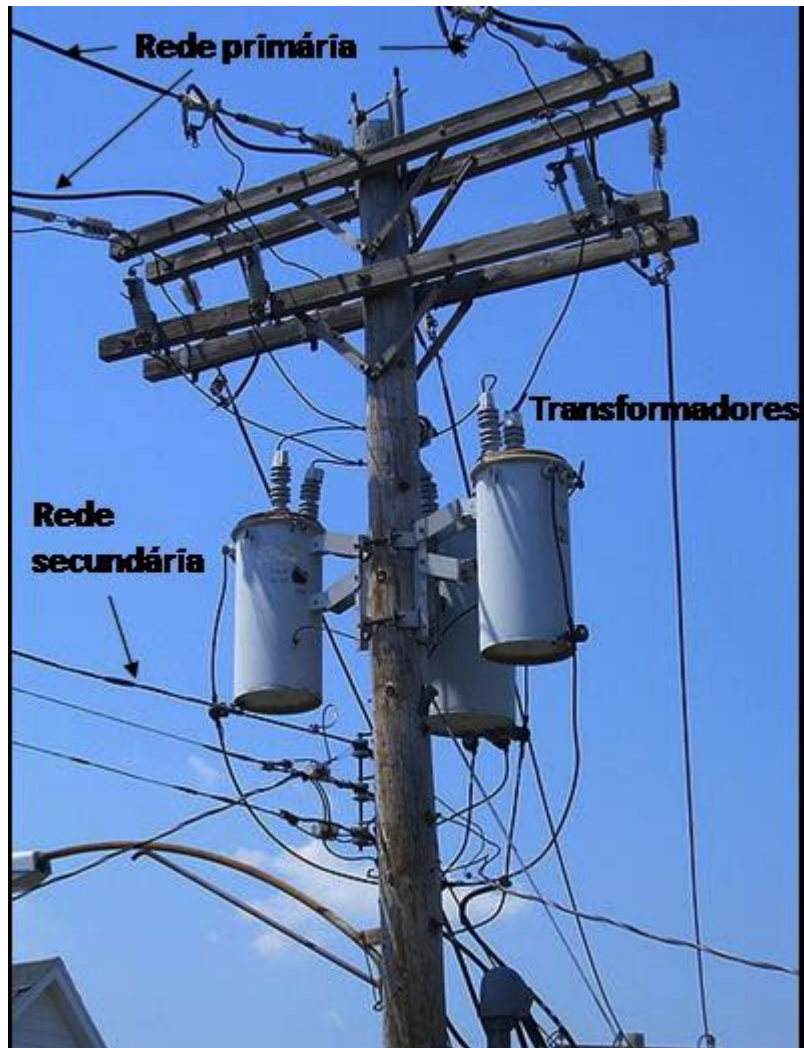
Sistema de distribuição



Fonte:
HELDWEIN, ML.
Introdução às
redes de
distribuição.

Sistema de distribuição

- Após a subestação:
 - sistema de distribuição primário
- LT entre 11,9 kV e 34,9 kV
- Secundário entre 110 e 380 V
- Transformadores Δ -Y ou Y- Δ
 - defasagem de 30° entre as tensões do primário e secundário



Exemplo (p. 62)

- Banco de transformadores trifásico 13,8 kV / 220 V
- Formado por uma associação de transformadores monofásicos de 13,8 kV / 127 V
- Pergunta-se:
 - Qual a conexão desses transformadores?
 - Se uma tensão de linha de 11 kV for aplicada no primário do banco, qual deve ser a tensão complexa de linha no secundário?

Resolução

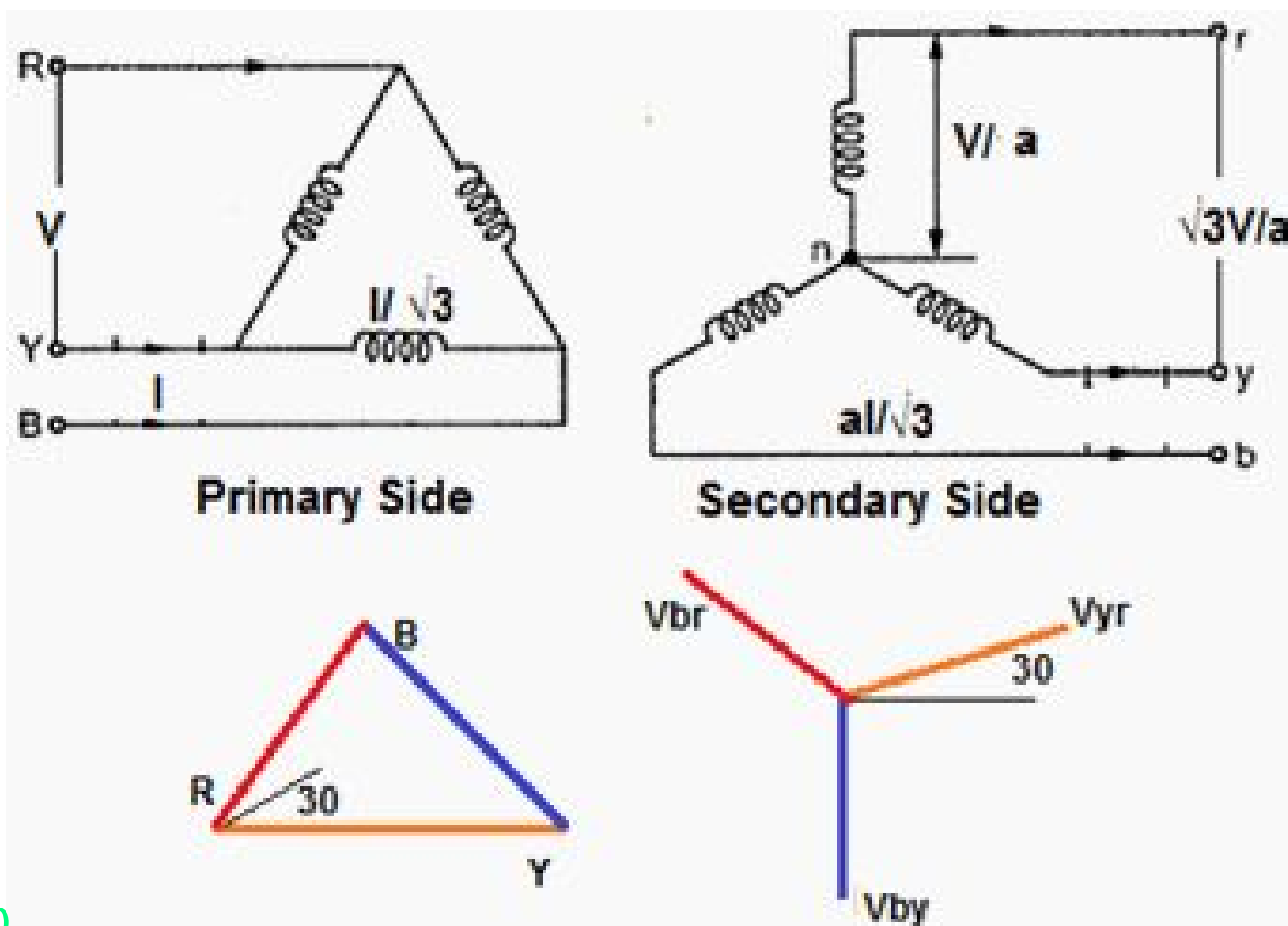
- Relação de transformação é tal que no secundário:
 - $V_f=127V$, $V_L=220V$, em cada transformador do banco

- Provavelmente a conexão do secundário do transformador é em estrela:

$$V_L = \sqrt{3} V_f = \sqrt{3} \times 127 \simeq 220 \text{ V}$$

- Primário do transformador: $V_L = 13,8 \text{ kV}$
 - Provável Δ , pois $V_L = V_f$ (o enunciado não fala em outra tensão)
- A conexão será então: $\Delta - Y$

(continua)



relação de
transformação

Fonte: electrical-engineering-portal.com

$$E_s = E_p \times a \sqrt{3} \angle 30^\circ = 11000 \angle 0^\circ \times \frac{127}{13800} \sqrt{3} \angle 30^\circ$$

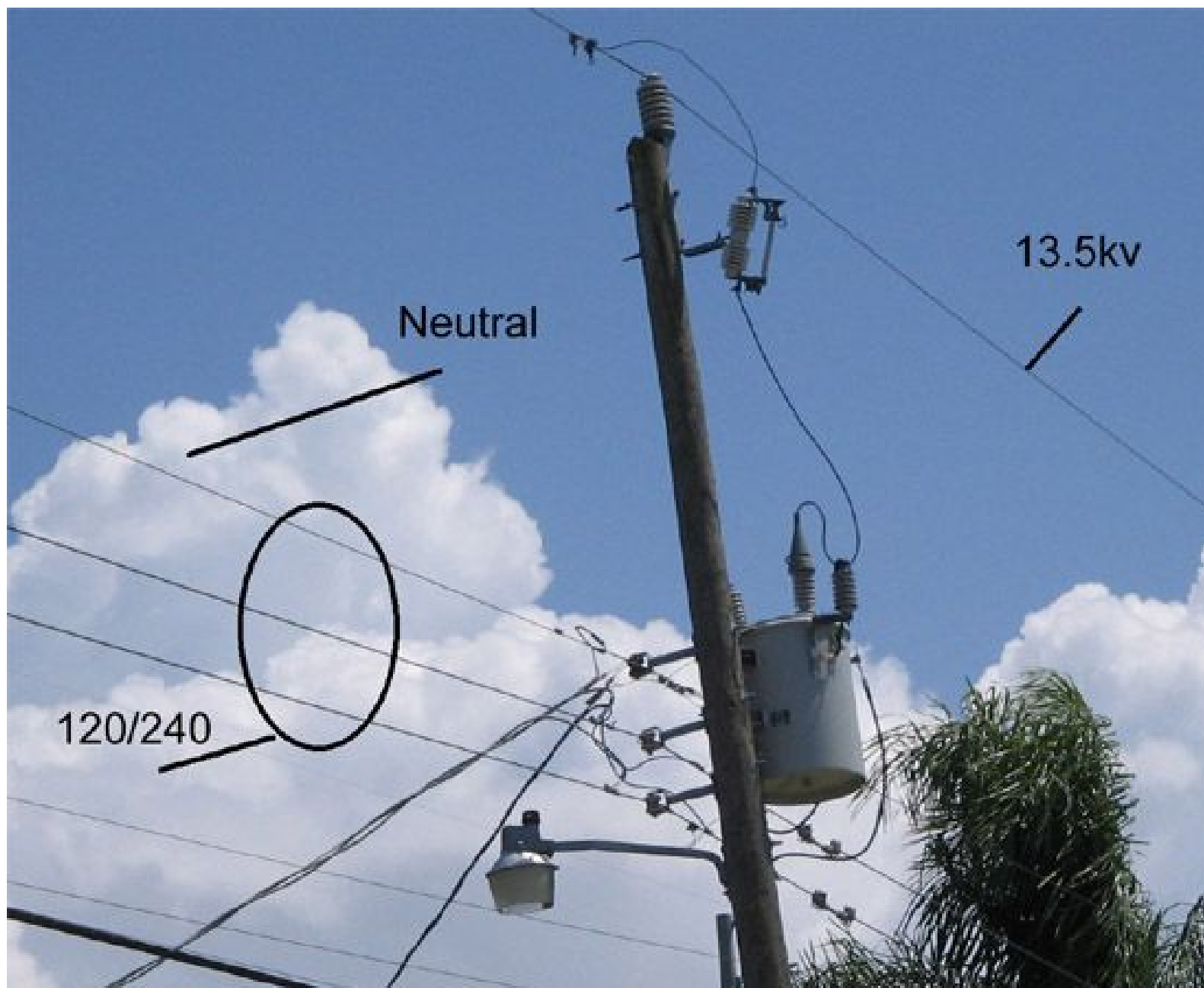
$$E_s = 175,4 \angle 30^\circ \text{ V}$$

Se for aplicado 11 kV

Redes de distribuição secundárias

- Transformadores
 - trifásicos
 - monofásicos interligados
 - *Multi-Grounded Comon Neutral* (MGCN)
 - *Phase 4 Wire Distribution*
 - *3 Phase 3 Wire "L-L" Distribution*
 - outros

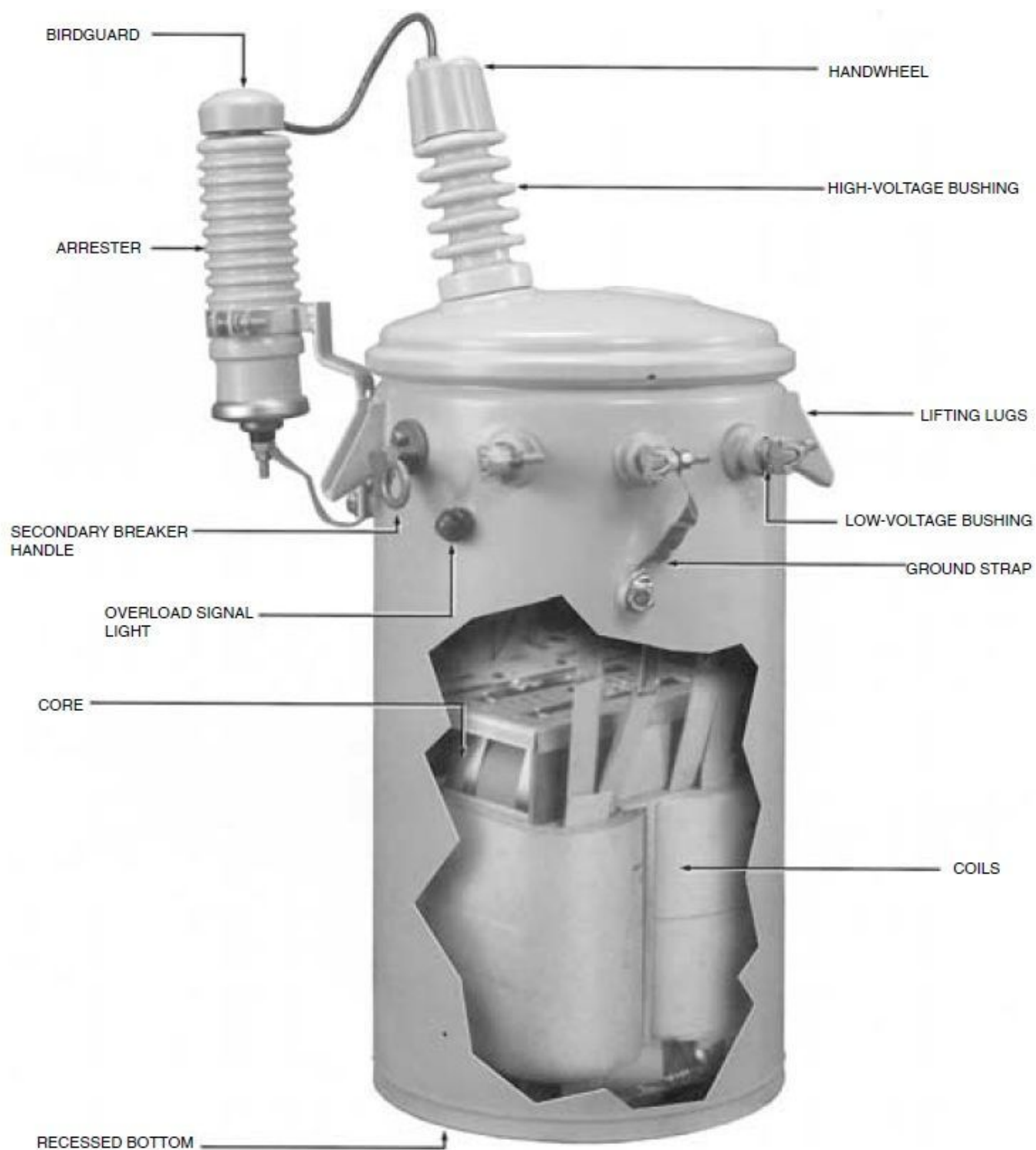
Exemplo



Exemplo



Fonte: daelim-electric.com



Fonte: Cooper
Power Systems

Single-phase overhead distribution transformer. Courtesy Cooper Power Systems

Fonte: www.alexanderpublications.com

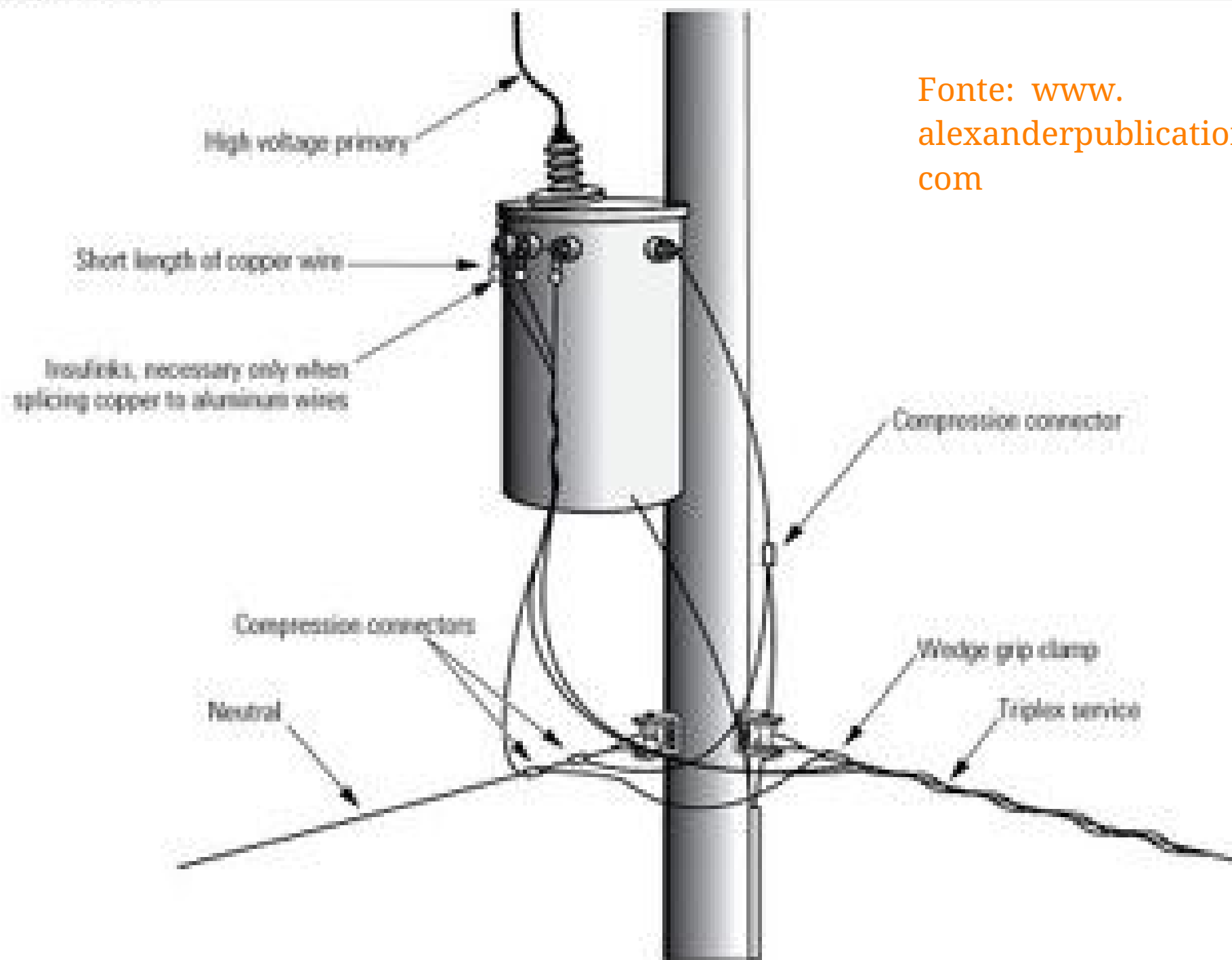
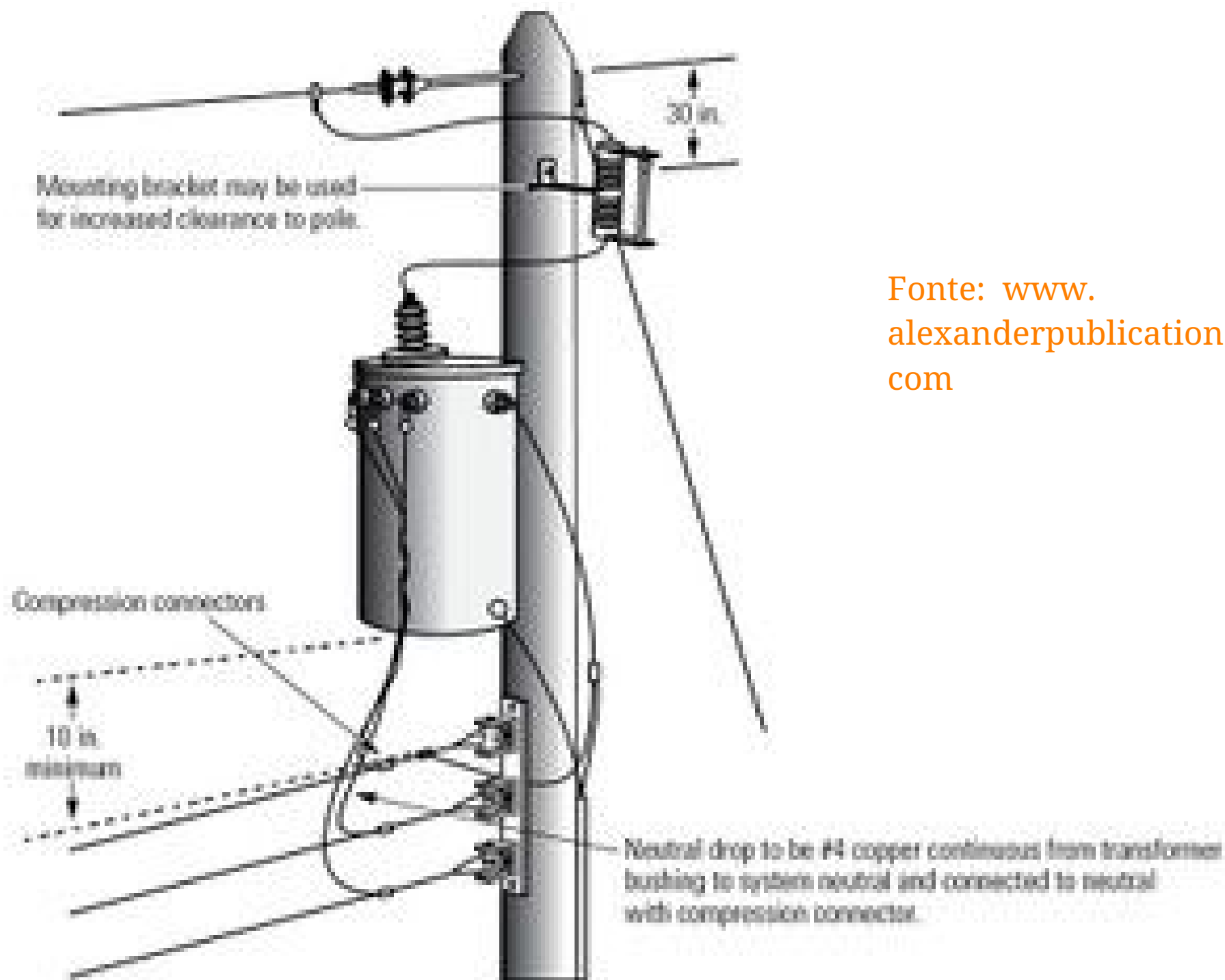


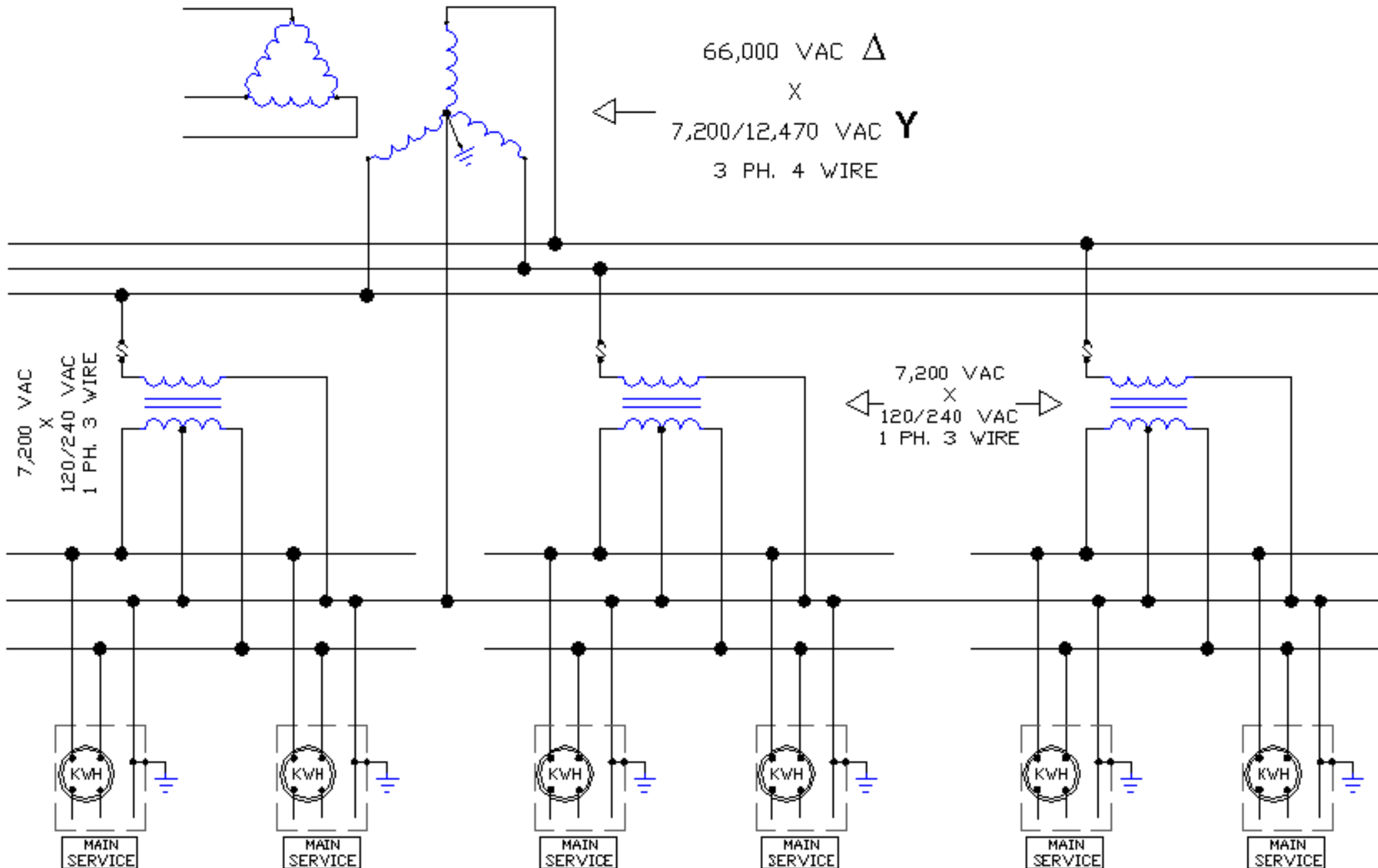
Figure 8-15. Triplex services from a single-phase transformer on a deadend pole, without a secondary rack



Fonte: www.alexanderpublications.com

Figure 8-16. Single-phase service installation from a deadend pole, with a secondary rack.

Multi-Grounded Common Neutral (MGCN)





Popular configurations



Double hanger bracket one high-voltage bushing conventional unit.



Single hanger bracket two high-voltage bushings conventional unit.

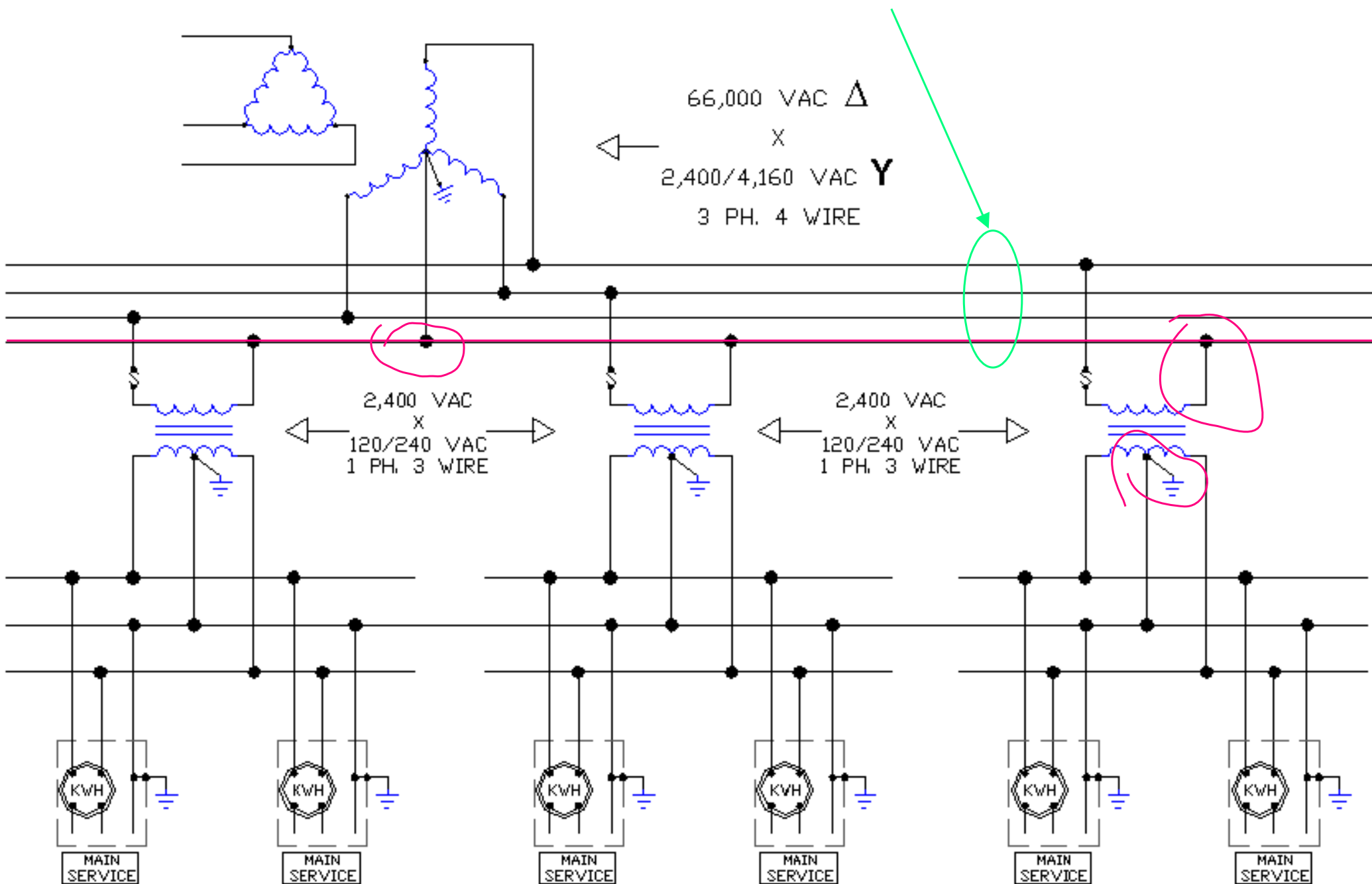


Single hanger bracket one high-voltage bushing self protected unit.

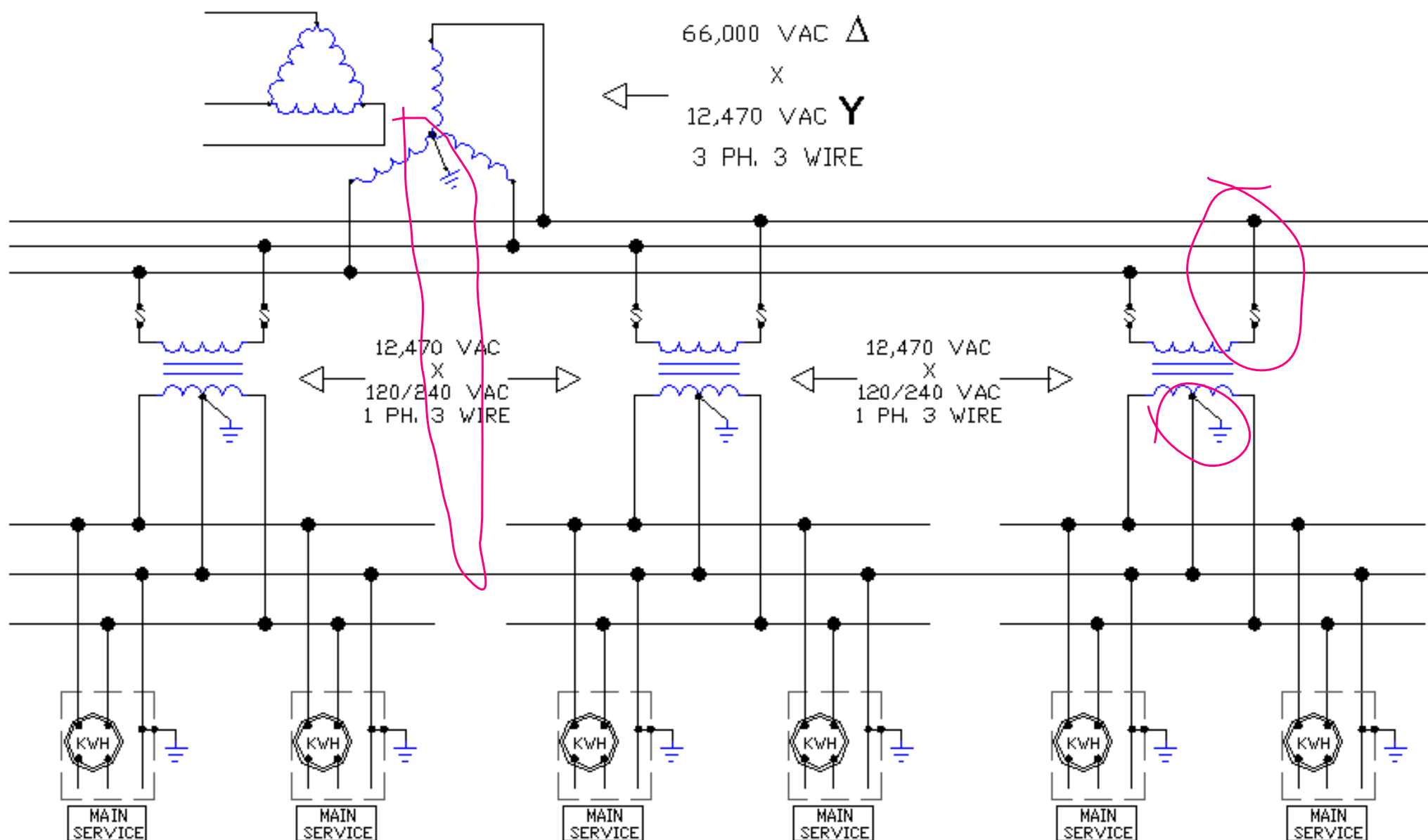
Exemplo

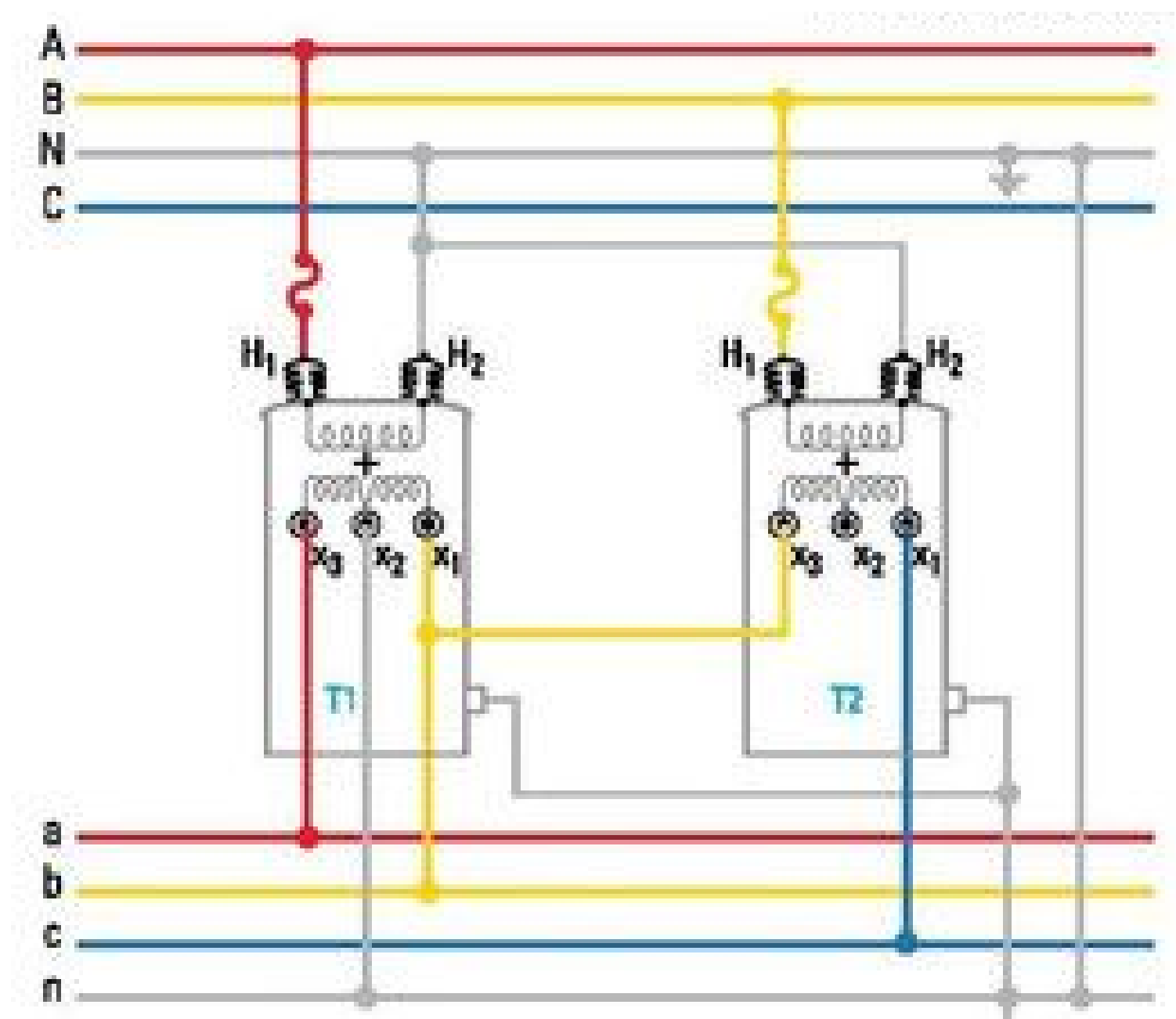


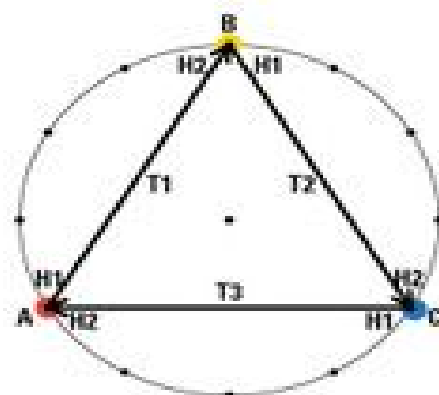
Phase 4 Wire Distribution



Phase 3 Wire "L-L" Distribution

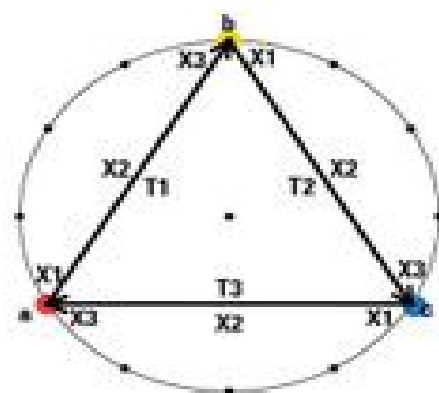






Primary Vector Diagram

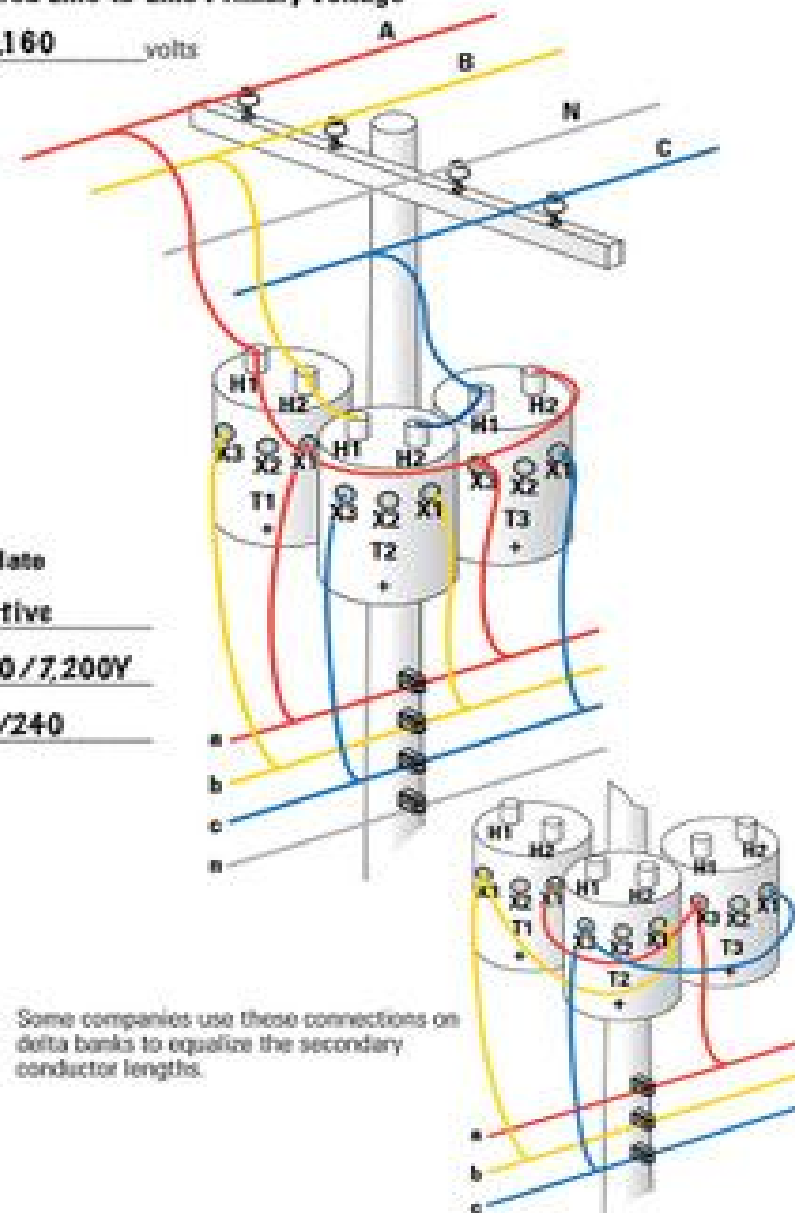
Transformer Nameplate

Polarity: AdditivePrimary volts: 4160/7,200YSecondary volts: 120/240

Secondary Vector Diagram

Measured Line-to-Line Primary Voltage

4160 volts



Some companies use these connections on delta banks to equalize the secondary conductor lengths.

Customer Needs		
Voltage	1, 2, or 3 phase(s)	Measured
240	3	a to b, b to c, c to a

Figure 14-12. Delta-delta vector diagrams and the physical configuration.

Fonte: www.alexanderpublications.com

Análise dos sistemas

- Existem diversos modelos de conexão das subestações
- Um alimentador, ou vários alimentadores
- Cada alimentador deve ser modelado de forma a garantir o significado da análise
- Em muitos casos esse modelo deve ser trifásico devido às características inerentes das redes de distribuição
- Às vezes, a tarefa mais difícil é obter todos os dados necessários

- O dados devem ser precisamente informados pela concessionária que deseja a análise
- Para um horizonte de análise de dias ou semanas, o modelo do consumidor deve ser levado em consideração
- *Modelar o consumidor* → modelar adequadamente as cargas do sistema

- O problema é que a carga no sistema de distribuição (ou no sistema elétrico de potência em geral) está mudando continuamente, de forma que não existe uma carga “em regime” propriamente dito
- A análise das cargas deve ser sempre feita no horizonte de tempo desejado, como no horizonte de um dia

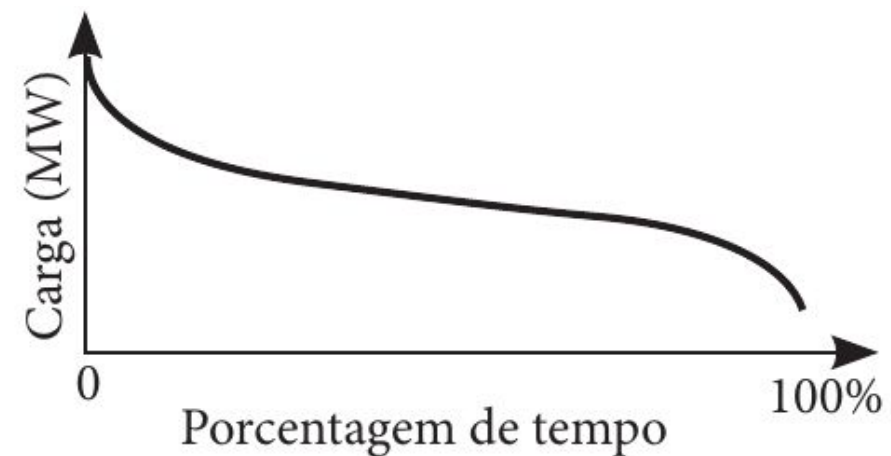
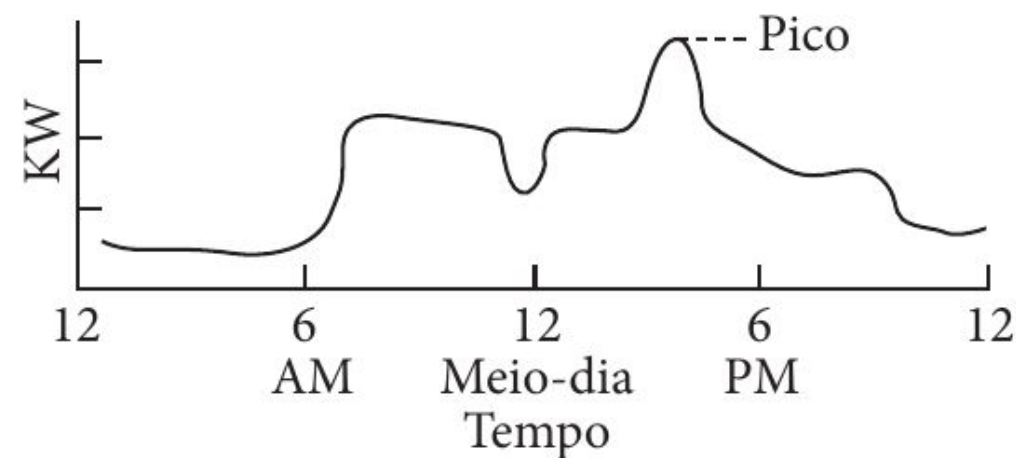


Figura 2.6 | Perfis de carga em sistemas de distribuição de energia

- Em muitos casos é necessário saber o comportamento da rede em situações de pico ou em situações de carga baixa, ou mesmo em algum período específico do dia
- Nestes casos é de extrema importância conhecer o perfil de consumo dos consumidores
- Em outros casos a carga pode ser simplesmente analisada em termos da porcentagem de tempo em um certo horizonte (dia, semana, mês ou ano)

Natureza das cargas

- Podem ser divididas em
 - industriais
 - comerciais
 - residenciais
- As concessionárias atendem a uma variedade de cargas
- O perfil de cargas industriais depende principalmente do segmento ao qual essa indústria pertence

- O perfil de consumo de cargas comerciais e residenciais consiste em um agregado de cargas de vários tipos:
 - Aquecimento elétrico
 - Iluminação (incandescente, fluorescente, etc.)
 - Motores para o acionamento de compressores de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar
 - Cargas baseadas em eletrônica de potência

Exemplo (p. 64)

- Fazer um estudo de fluxo de carga com demandas específicas
- Dados os valores das reatâncias de sequência positiva das linhas e os valores agregados das cargas
- Realizar alguns estudos rápidos utilizando o método desacoplado

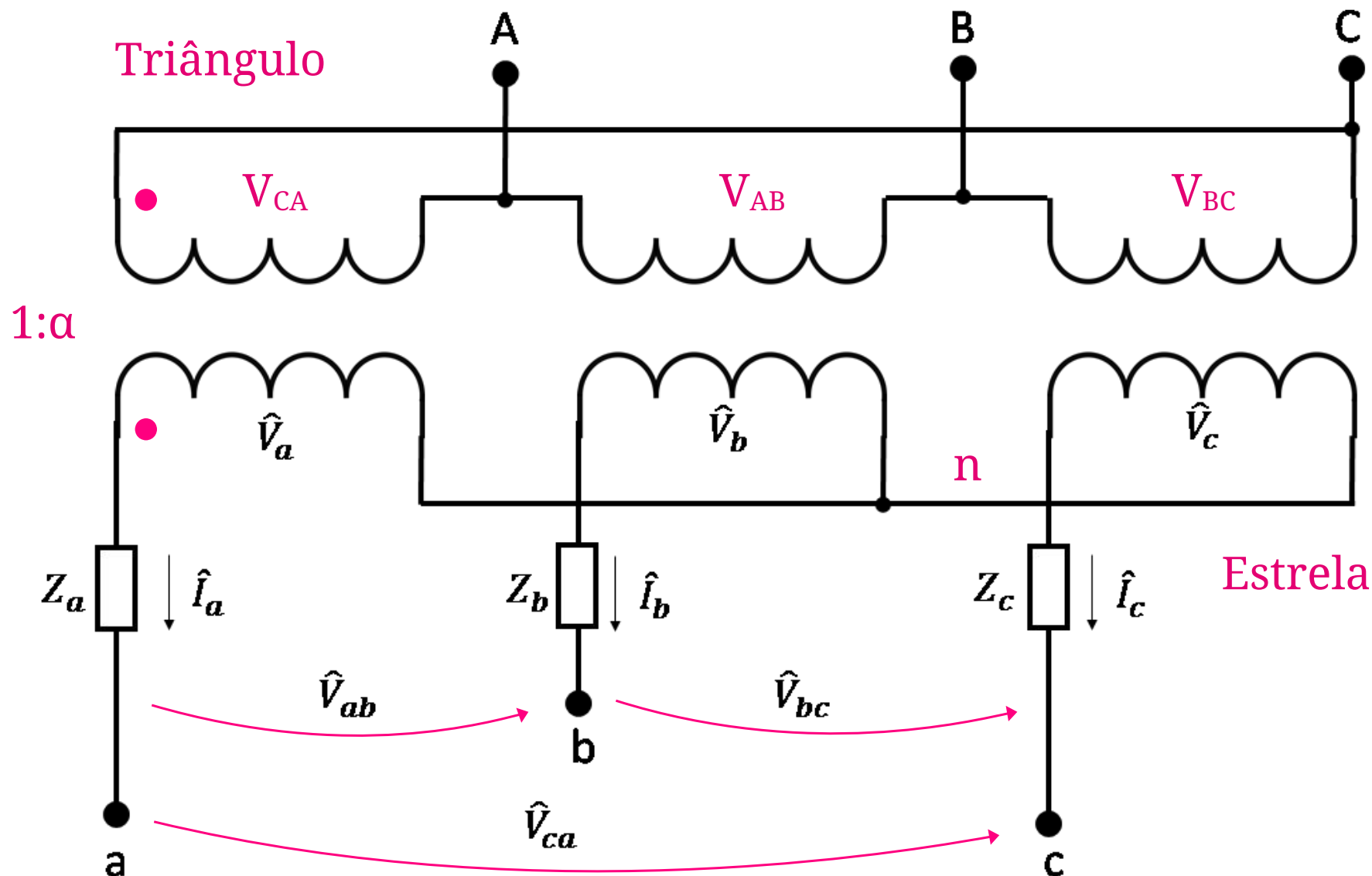
- Os sistemas de distribuição podem ter as suas capacitâncias shunt desprezadas
 - a princípio o fornecimento apenas da reatância da linha não seria um problema por conta da falta de informação dos valores shunt
- Contudo, sabemos que o valor da resistência é significativo e deve ser considerado para fins de cálculo
- O fornecimento apenas da reatância fará com que os resultados obtidos com o fluxo de carga sejam divergentes do valor real da rede

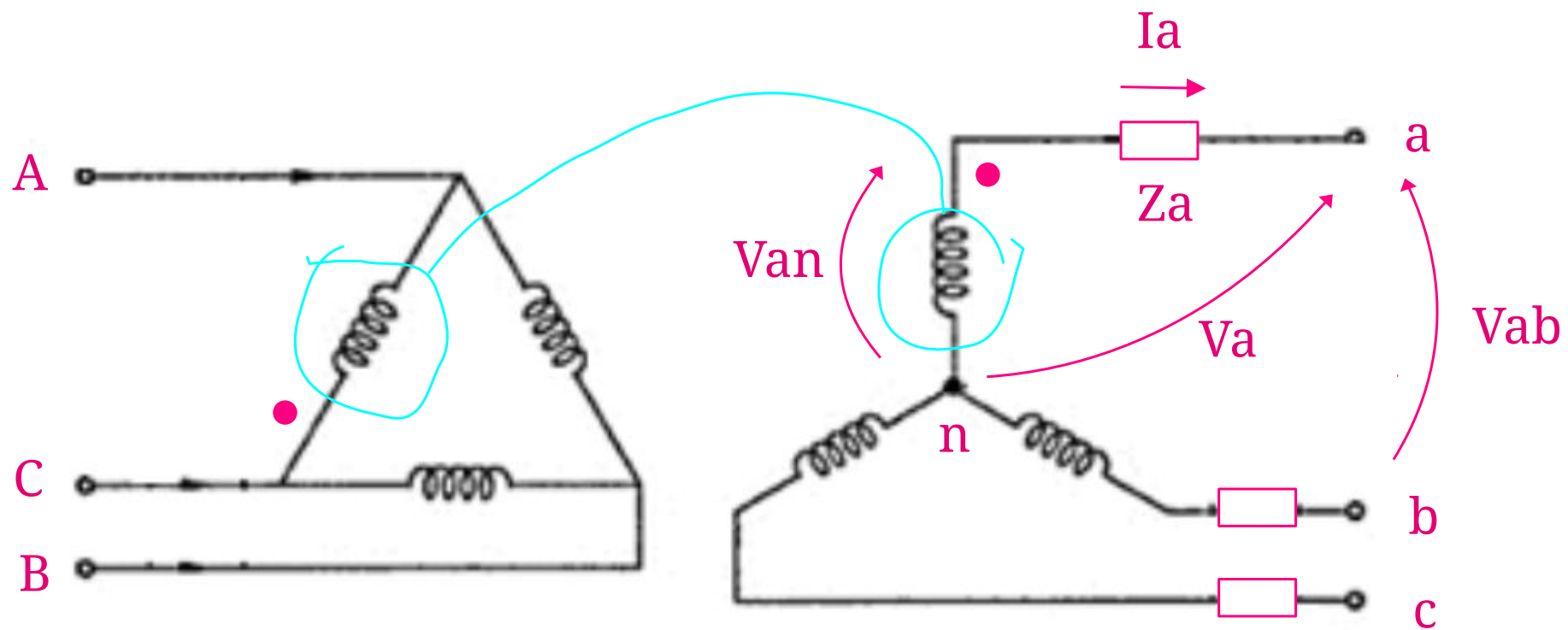
- Foram fornecidos apenas os valores da sequência positiva da rede
- Outra diferença em relação à transmissão é que as linhas possuem parâmetros assimétricos e cargas desequilibradas
- Isso requer que o modelo da rede seja trifásico, ou seja, os valores apenas de sequência positiva não são suficientes para realizar uma análise precisa

- Além disso, o método desacoplado assume:
 - níveis de tensão planos
 - despreza as resistências das linhas
 - Desta forma também não poderia ser utilizado, pois ocorreriam muitos erros pela desconsideração da resistência
 - Para uma análise mais precisa é necessário inicialmente obter os valores shunt das linhas e as resistências, assim como um método adequado que realize a análise da rede sem correr o risco de produzir resultados errôneos
 - Neste caso a concessionária deverá fornecer mais informações
-

EXEMPLO p. 65 - Construção
matricial dos transformadores
conectados em Δ -Y

Esquema de conexão do transformador





- Modelagem de sistema de distribuição para realizar o cálculo de fluxo de carga
- Pensar em um programa de computador para realizar esse cálculo
- É necessário modelar matricialmente os elementos trifásicos
- Um desses elementos é o transformador cuja conexão é modelada em Δ -Y

- Dados: tensões e correntes que passam por esse transformador, cuja impedância é modelada para o lado do secundário
- Descrever um modelo matricial para que as quantidades trifásicas possam ser ajustadas matricialmente no programa

Resolução

- Precisamos determinar as quantidades que serão modeladas via matrizes
- Podemos definir as matrizes de tensões de linha, impedância e corrente de linha do secundário do transformador:

(continua no próximo slide)

$$[V_{ABC}] = \begin{bmatrix} \check{V}_{AB} \\ \check{V}_{BC} \\ \check{V}_{CA} \end{bmatrix} \quad (\text{tensões de linha do primário})$$

$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} \check{V}_{ab} \\ \check{V}_{bc} \\ \check{V}_{ca} \end{bmatrix} \quad (\text{tensões de linha do secundário})$$

$$[I_{abc}] = \begin{bmatrix} \check{I}_a \\ \check{I}_b \\ \check{I}_c \end{bmatrix} \quad (\text{corrente de linha do secundário})$$

$$[Z_{TR}] = \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \quad (\text{matriz de impedância do Trafo})$$

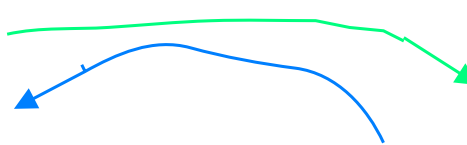
- Tensões de fase no secundário

$$\check{V}_{an} = \check{V}_a - Z_a \check{I}_a = \alpha \check{V}_{CA} - Z_a \check{I}_a$$

$$\check{V}_{bn} = \check{V}_b - Z_b \check{I}_b = \alpha \check{V}_{AB} - Z_b \check{I}_b$$

$$\check{V}_{cn} = \check{V}_c - Z_c \check{I}_c = \alpha \check{V}_{BC} - Z_c \check{I}_c$$

- Tensões de linha no secundário



$$\begin{aligned}\check{V}_{ab} &= \check{V}_{an} - \check{V}_{bn} = \left(\alpha \check{V}_{CA} - Z_a \check{I}_a \right) - \left(\alpha \check{V}_{AB} - Z_b \check{I}_b \right) \\ \check{V}_{bc} &= \check{V}_{bn} - \check{V}_{cn} = \left(\alpha \check{V}_{AB} - Z_b \check{I}_b \right) - \left(\alpha \check{V}_{BC} - Z_c \check{I}_c \right) \\ \check{V}_{ca} &= \check{V}_{cn} - \check{V}_{an} = \left(\alpha \check{V}_{BC} - Z_c \check{I}_c \right) - \left(\alpha \check{V}_{CA} - Z_a \check{I}_a \right)\end{aligned}$$

- Rearranjando teremos

$$\begin{aligned}
 \check{V}_{ab} &= \check{V}_{an} - \check{V}_{bn} = \left(\alpha \check{V}_{CA} - \alpha \check{V}_{AB} \right) - Z_a \check{I}_a + Z_b \check{I}_b \\
 \check{V}_{bc} &= \check{V}_{bn} - \check{V}_{cn} = \left(\alpha \check{V}_{AB} - \alpha \check{V}_{BC} \right) - Z_b \check{I}_b + Z_c \check{I}_c \\
 \check{V}_{ca} &= \check{V}_{cn} - \check{V}_{an} = \left(\alpha \check{V}_{BC} - \alpha \check{V}_{CA} \right) - Z_c \check{I}_c + Z_a \check{I}_a
 \end{aligned}$$

- Escrevendo matricialmente

$$\begin{bmatrix} \check{V}_{ab} \\ \check{V}_{bc} \\ \check{V}_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha & 0 & \alpha \\ \alpha & -\alpha & 0 \\ 0 & \alpha & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \check{V}_{AB} \\ \check{V}_{BC} \\ \check{V}_{CA} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 1 & n \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \check{I}_a \\ \check{I}_b \\ \check{I}_c \end{bmatrix}$$

- Essas matrizes podem ser modeladas via software e as quantidades trifásicas podem ser utilizadas no cálculo