

NOÇÕES BÁSICAS DE TRACÇÃO ELÉCTRICA PARA REDES DE METRO LIGEIRO

(Manuel Bolotinha ^{*i)})

ÍNDICE

Abreviaturas, Siglas e Símbolos	2
1. INTRODUÇÃO	3
2. DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA NA REDE DE TRACÇÃO ELÉCTRICA	3
3. CRITÉRIOS BASE DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE TRACÇÃO ELÉCTRICA	6
4. REDE DE MÉDIA TENSÃO	7
5. SUBESTAÇÕES DE TRACÇÃO	7
6. ALIMENTAÇÃO DA LINHA DE CONTACTO.....	12
7. LINHA DE CONTACTO	13
8. PROBLEMAS ESPECÍFICOS DOS SISTEMAS DE TRACÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA	20
9. FRENAGEM E RECUPERAÇÃO DE ENERGIA	22

Abreviaturas, Siglas e Símbolos

- AIS – Air Insulated Substation
- AMV – Aparelho de mudança de via
- AS – Armário de Seccionadores
- AT – Alta Tensão
- AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
- BT – Baixa Tensão
- CA – Corrente alternada
- CC – Corrente contínua
- CCO – Centro de Controlo Operacional
- DST – Descarregador de sobretensões
- DUR – Disjuntor ultra rápido de corrente contínua
- EN – Normas Europeias
- FC – Fios de contacto
- GIS – Gas Insulated Substation
- IEC – *International Electrotechnical Commission*
- IED – *Intelligent Electronic Device*
- IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
- ISO – International Organization for Standardization
- LCE – Linha de contacto de tracção eléctrica
- MT – Média Tensão
- NP – Normas Europeias
- PCCS – Posto de Comando e Controlo da SET
- PDT – Posto de Transformação e Distribuição
- PMO – Parque de Material e Oficinas
- QCC – Quadro de Corrente Contínua (alimentação da LCE)
- QMT – Quadro de Média Tensão
- QSACA – Quadro dos Serviços Auxiliares de Corrente Alternada
- QSACA – Quadro dos Serviços Auxiliares de Corrente Alternada
- QSACC – Quadro dos Serviços Auxiliares de Corrente Contínua
- RMT – Rede de Média Tensão
- RT – Rectificador de Tracção
- SACA – Serviços Auxiliares de Corrente Alternada
- SACC – Serviços Auxiliares de Corrente Contínua
- SCADA – *Supervisory Control and Data Aquisition*
- SET – Subestação Eléctrica de Tracção
- SMT – Sub-sistema de Média Tensão
- SSCE – Sistema de Comando e Controlo dos Equipamentos da SET
- SSCS – Sistema de Supervisão e Controlo
- ST – Sub-sistema de corrente contínua
- TD – Transformador de Distribuição
- THD – Distorção Harmónica Total (*Total Harmonic Distortion*)
- TSA – Transformador dos Serviços Auxiliares
- TT – Transformador de Tracção
- UE – União Europeia
- UPS – *Uninterruptible Power Supply*
- URT – Unidade Remota de Transmissão

1. INTRODUÇÃO

Numa altura em que a utilização de meios de transporte públicos menos poluentes e com menor emissão de gases de efeito de estufa, a utilização nos transportes urbanos e sub-urbanos de *redes de metro ligeiro*¹ (alimentados por energia eléctrica) apresenta-se como uma solução que importa reter.

Apresentam-se as principais características dos **sistemas de tracção eléctrica**, designadamente os seus componentes, os critérios básicos de cálculo do sistema e os problemas mais importantes que a *tracção eléctrica* coloca a quem a projecta.

Nas redes de metro ligeiro as composições são habitualmente alimentadas em corrente contínua, usualmente **750 V**, um dos valores estipulados nas normas *EN 50163 – Railway applications – Supply voltages of traction systems* e *IEC 60850 – Railway applications – Supply voltages of traction systems*.

Como qualquer sistema de tracção eléctrica, distinguem-se três grandes sub-sistemas:

- Alimentação de energia em corrente alternada, normalmente em média tensão.
- Equipamentos de corrente contínua;
- Linha de contacto (**LCE**)², para distribuição do “positivo” de corrente contínua à qual liga o pantógrafo das composições do metro ligeiro, para alimentação dos respectivos motores (o retorno, isto é, o “negativo” é feito pelos carris).

Quando a construção da *rede de metro ligeiro* **não** é feita em *Portugal* os *regulamentos* e as *normas NP e NP EN* citadas neste documento devem ser substituídas pelos regulamentos e normas equivalentes em vigor no país de construção; o mesmo princípio se aplica às normas *EN* consideradas no caso em que a construção se realiza em países que não pertencem à *UE*³.

2. DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA NA REDE DE TRACÇÃO ELÉCTRICA

Neste capítulo aborda-se de uma forma geral a distribuição de energia à **LCE**, considerando os **sub-sistemas** referidos no parágrafo anterior.

O *sub-sistema de alimentação em corrente alternada*, que designaremos por **SMT**, é geralmente constituído por:

- Uma rede privada de distribuição em *MT (RMT)*.

¹ O “metro ligeiro” entende-se como um tipo de comboio urbano e/ou sub-urbano, geralmente de superfície, mas que pode ter também troços subterrâneos, que tem equipamentos e infra-estruturas mais leves, mais flexíveis e geralmente mais económicos que os tipos convencionais de comboios e de metros, mas que são mais “pesadas” que os também tradicionais eléctricos.

² A *LCE* é habitualmente designada por *catenária*. Em rigor, **catenária** é a curva descrita por um cabo (neste caso metálico, condutor) tracionado entre dois pontos fixos e sujeito à acção da gravidade. A curva exprime-se pela função hiperbólica $f(x) = a \cdot \cosh(x/a) = (a/2) \cdot (e^{(x/a)} + e^{-(x/a)})$, sendo $a = m' \cdot H/T_H$, onde m' é a massa por unidade de comprimento, H a distância entre apoios e T_H o esforço de tracção do cabo.

³ São exemplos de regulamentos de outros países a norma *NFPA (National Fire Protection Association) 70 – National Electrical Code (NEC)* nos **USA**; *Norme NF C13-200 de 2009 – Installations électriques à haute tension - Règles complémentaires pour les sites de production et les installations industrielles, tertiaires et agricoles* e *Norme NF C15-100 de 2013 – Installations électriques à basse tension - Version compilée de la norme NF C15-100 de décembre 2002, de sa mise à jour de juin 2005, de ses amendements A1 d'août 2008, A2 de novembre 2008, A3 de février 2010 et A4 de mai 2013, de ses rectificatifs d'octobre 2010 et de novembre 2012 et des fiches d'interprétation F11, F15, F17, F21 à F2, em França*; *BS Standard 7671 (IET Wiring Regulations)* no **Reino Unido**. São exemplo de outras normas as *NBR (Brasil)*; *NFPA, IEEE e ANSI (American National Standards Institute)* nos **USA**.

- Quadro de Média Tensão (**QMT**).
- Transformador(es) de três enrolamentos *MT/BT1/BT2*, designados por Transformador(es) de Tracção (**TT**).

O **QMT** e os **TT** são instalados em edifícios próprios, nas designadas *Subestações Eléctricas de Tracção (SET)*, que serão analisadas com mais detalhe no Capítulo 5, onde igualmente se encontram os equipamentos de corrente contínua, sub-sistema designado por **ST**, e que é basicamente constituído por:

- Rectificador(es) de Tracção (**RT**), também designados por *grupos de tracção*.
- Quadro de Corrente Contínua (**QCC**).
- Armário de Seccionadores (**AS**).

Os **AS** constituem a fronteira entre a **SET** e a **LCE**, havendo soluções em que estes equipamentos são instalados fora das *SET*, junto à via. Apesar deste facto, neste artigo considerar-se-ão os **AS** como equipamentos das *SET*.

Os **AS** destinam-se a permitirem o **paralelo entre vias** e o **shunt entre secções elementares da LCE**; essas secções são definidas pelos **isoladores de secção** instalados na *LCE*, junto a cada *SET*, podendo cada *AS* alimentar duas secções elementares contíguas. Os cabos de ligação em corrente contínua quer à *LCE* quer aos carris, estabelecidos a partir dos **AS** são habitualmente designados por **feeders de corrente contínua**.

A **LCE**, ou seja a *linha aérea de corrente contínua (positivo)*, é fundamentalmente constituída pelos *condutores, postes de apoio e isoladores de secção*. O Capítulo 7 analisará com mais pormenor esta instalação, designadamente a definição de secção elementar.

A **ligação à rede pública de distribuição MT** é feita em algumas *SET*, de acordo com os critérios de projecto do sistema e as disponibilidades do distribuidor de energia eléctrica.

Contudo, nalgumas linhas de metro ligeiro a opção para a alimentação geral das *SET* foi a construção de uma subestação privada *AT/MT* de onde são estabelecidas as alimentações *MT* às diversas *SET*.

A **subestação AT/MT**, caso exista, é uma subestação clássica, com os equipamentos **AT** instalados no exterior (subestação do tipo **AIS**) ou no interior, sendo neste caso do tipo **GIS**, enquanto os equipamentos **MT** são instalados no interior, num **QMT**. A análise desta subestação não faz parte do âmbito deste artigo.

Há ainda a considerar o aspecto do **sistema de comando e controlo** quer de cada uma das *SET* quer do conjunto das *SET*, tema que será abordado no Capítulo 5.

Na Figura 1 apresenta-se um **esquema simplificado da rede de energia de uma rede de metro ligeiro (distribuição de corrente alternada, SET e LCE)**.

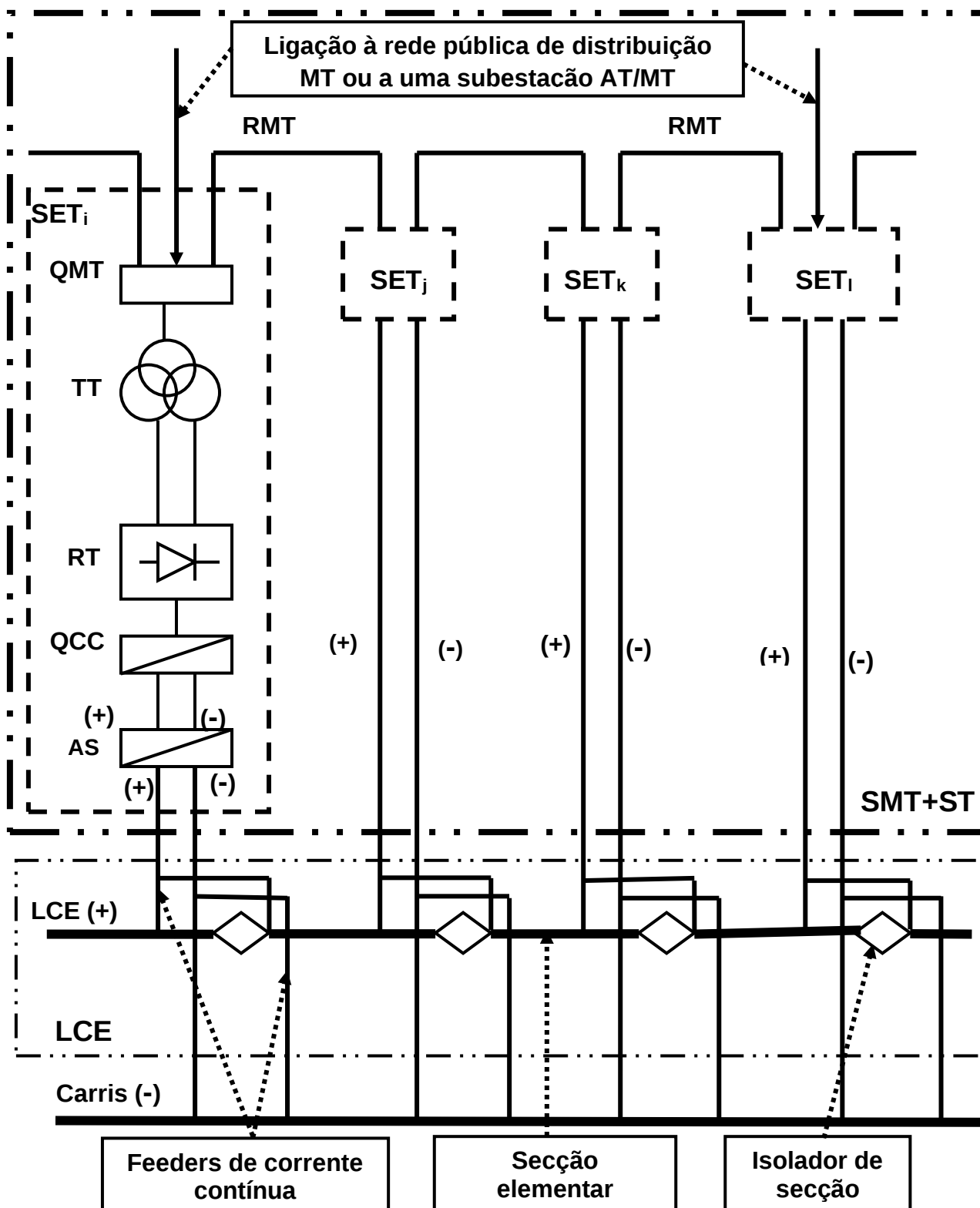


Figura 1 - Esquema simplificado de distribuição de energia numa rede de metro ligeiro

Notas:

1) Caso exista a subestação AT/MT os cabos de ligação desta subestação às SET também fazem parte da RMT.

2) O **isolador de secção** e a sua função serão abordados no Capítulo 6.

3. CRITÉRIOS BASE DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE TRACÇÃO ELÉCTRICA

O dimensionamento do sistema de tracção eléctrica deve ser feito tendo em atenção que as tensões **máxima** (*permanente mais alta*) e **mínima** (*permanente mais baixa*) na LCE fiquem compreendidas nos intervalos definidos nas já referidas normas *EN 50163* e *IEC 60850*; para um sistema com tensão nominal **750 V CC** esse intervalo é **[500 V CC, 900 V CC]**.

Assim, é necessário calcular e definir:

- Configurações da *RMT*.
- Secção dos cabos da *RMT*.
- Número de *SET*.
- Localização e distância entre elas.
- Número e potência dos *TT* e *RT*.
- Secção dos *feeders de corrente contínua*.
- Secção dos condutores da LCE, considerando uma **redução de 20%** (para reflectir o *desgaste provocado pelo atrito do pantógrafo das composições*).
- Necessidade de instalação de *feeders auxiliares* (cabos de corrente contínua enterrados em paralelo com a LCE), para garantir que a tensão na LCE, em quaisquer condições, *se mantém no intervalo atrás referido*.

O dimensionamento do sistema é feito em função de um *cenário de exploração*, **em hora de ponta**, que considera não só as *características dos veículos* e a **carga máxima** (*número de passageiros por m²*), mas também a **cadência** (*número de composições/h/sentido*), a *distribuição espacial* das composições, o *tempo de paragem* em cada estação e o *tempo de reversão*, definindo-se habitualmente três condições de exploração para os quais é necessário garantir no pantógrafo das composições a tensão mínima de funcionamento:

- Condições normais (CN): estão disponíveis todas as **SET** e todas as ligações à rede pública de distribuição MT.

- Condições de degradação 1 (D1): indisponibilidade de uma *SET*. Todas as ligações à rede pública de distribuição MT estão disponíveis e a presença de uma condição de degradação **D1** não deverá implicar consequências de degradação na utilização dos veículos.

- Condições de degradação 2 (D2): indisponibilidade de uma ligação à rede pública de distribuição MT e todas as *SET* encontram-se disponíveis. No caso de presença de uma degradação do tipo **D2** o sistema de distribuição de média tensão funcionará de forma a não causar degradação com a utilização dos veículos.

É necessário também considerar a existência de *Parques de Material e Oficinas (PMO)*, com necessidades específicas de energia eléctrica não só para o funcionamento das diversas instalações, designadamente as oficinas de reparação das composições, mas também para tracção eléctrica, e de postos de transformação (*PDT*) destinados a alimentar as **instalações específicas de estações subterrâneas**

e **túneis** (meios mecânicos de movimentação de pessoas, sistemas de desenfumagem, etc.)

É assim necessário calcular as **quedas de tensão** na *RMT* e na *LCE* para o cenário determinado e para cada uma das condições de exploração atrás referidas.

O dimensionamento da *RMT* inclui ainda o **cálculo das correntes de curto-circuito** e o **estudo da selectividade das protecções**.

A título de exemplo representa-se na Figura 2 uma configuração da *RMT*, em condição CN.

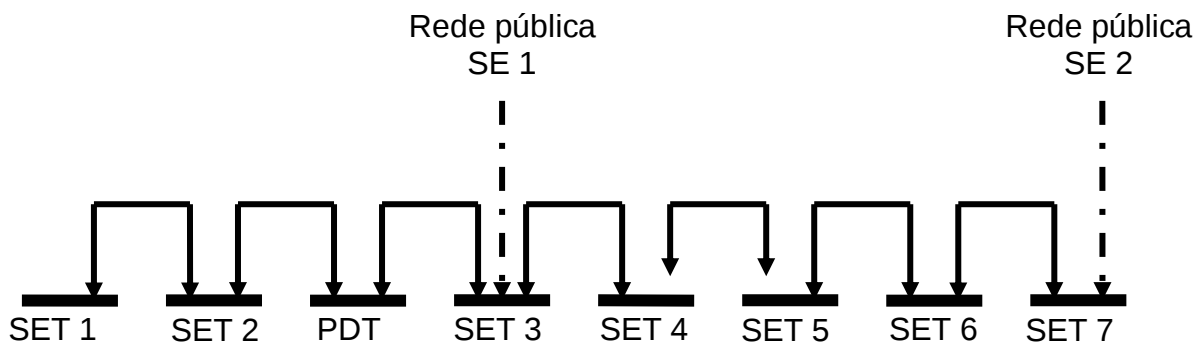


Figura 2 - Configuração de uma RMT em condição CN

4. REDE DE MÉDIA TENSÃO

A *RMT* deve obedecer ao *RSLEAT* (*Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão*) – Decreto Regulamentar nº 1/92 de 18 de Fevereiro.

Os cabos da *RMT* são habitualmente instalados ao longo da via, em tubos de polietileno, enterrados, ou em caleiras com septos, sendo habitualmente unipolares, dos tipos **XHI1AZ1** (condutores em cobre; isolamento em polietileno reticulado – XPLE – blindagem constituída por fitas de cobre; armadura em fita de alumínio; bainha exterior de poliolefina (*PO*) com baixo teor de halogéneos) ou **LXHI1AZ1** (idem anterior, mas com condutores em alumínio).

A opção por cabos com bainha exterior com baixo teor de halogéneos é explicável pelo facto de os cabos serem, na generalidade, instalados em zonas urbanas.

5. SUBESTAÇÕES DE TRACÇÃO

5.1. Considerações Gerais

Para além do *QMT*, *TT*, *RT*, *QCC* e *AS* anteriormente referidos as *SET* dispõem ainda de:

- Um transformador de serviços auxiliares (*TSA*), **MT/0,4-0,231 kV**, seco, **IP00⁴**, habitualmente com uma potência de **100 kVA**.
- Um quadro de serviços auxiliares de corrente alternada (*QSACA*).

⁴ Os índices de protecção dos equipamentos estão definidos nas normas *IEC 60529* e *EN 60529* – *Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*.

- Um sistema de alimentação em corrente contínua **110 V** para os serviços auxiliares (*rectificador e bateria, com funcionamento em tampão*).
- Um quadro de serviços auxiliares de corrente contínua (QSACC).

Nas SET podem ainda existir **UPS** e sistemas de *corrente contínua 48 V*, destinados à alimentação dos sistemas de telecomunicações e de sinalização da via, instalações que não estão incluídas no âmbito deste artigo.

Ao conjunto **TT-RT** é habitual chamar-se **grupo de tracção**. Caso numa SET existam dois grupos de tracção, normalmente um é **reserva** do outro.

As SET devem obedecer ao *RSSPTS (Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Seccionamento)* – Decreto nº 42895 de 31 de Março de 1960, alterado pelos Decretos Regulamentares nº 14/77 de 18 de Fevereiro e nº 56/85 de 6 de Setembro e também às *RTIEBT (Regras Técnicas das Instalações Eléctricas em Baixa Tensão)* – Portaria nº 949-A/2006 de 11 de Setembro.

5.2. Quadro de Média Tensão

O QMT pode ser do tipo *Metal-Enclosed (aparelhagem fixa)* ou do tipo *Metal Clad (aparelhagem extraível)*, constituído por *celas modulares*, sendo este último tipo uma solução mais flexível do ponto de vista de exploração e manutenção da rede.

O QMT deverá obedecer às normas *IEC 60694 – Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards, 60271-200 – A.C. metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV* e *60271-202 – High-voltage switchgear and controlgear – Part 202: High-voltage/low-voltage prefabricated substation* e *IEC 60529* e *EN 60529 – Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*.

Tipicamente o QMT é constituído pelas seguintes celas:

- 2 celas de anel
- 1 cela de corte geral e medida
- 1 ou 2 celas de protecção TT
- 1 cela de protecção TSA
- 1 cela de entrada da rede pública ou da subestação privada AT/MT (apenas nas SET onde se realiza esta ligação)

5.3. Transformadores de Tracção

Os TT utilizados para a tracção eléctrica têm *três enrolamentos (MT $\pm$ 2x2,5%/BT1/BT2 – se a tensão contínua for 750 V, BT1 = BT2 = 622 V)*, com *ligação Dd0y11*, *regulação em vazio e secos*, **IP00**, devendo obedecer ao estipulado na norma *IEC 60726 – Dry-type power transformers*.

A opção por transformadores secos é explicável pelo facto de as SET serem, na generalidade, instaladas em zonas urbanas, havendo que minimizar o risco de incêndio que é maior nos transformadores isolados a óleo.

5.4. Rectificadores de Tracção

Os RT, que devem obedecer ao estipulado nas normas *IEC* e *EN 60146 – Semiconductor converters* e *61071 – Power electronic capacitors*, são constituídos por

duas pontes de Graetz⁵ dodecafásicas (para limitar os efeitos das harmónicas – ver Capítulo 8.2) ligadas em paralelo por bobine interfásica.

Os equipamentos serão alojados em três armários metálicos diferentes, destinando-se dois armários às pontes de *Graetz* e um armário à bobina interfásica.

5.5. Quadro de Corrente Contínua e Armário de Seccionadores

O **QCC** de base, que deve obedecer às normas *EN 50123-1 – Railway applications. Fixed installations. D.C. switchgear. General* e *50123-2 Railway applications. Fixed installations. D.C. switchgear. D.C. circuit breaker* e *IEC 60529* e *EN 60529 – Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*, é composto por celas de três tipos diferentes:

- Uma ou duas celas de chegada do rectificador de tracção – **DS**.
- Uma cela de ligação do negativo aos carris (*retorno de tracção*) – **NEG**.
- Celas dos *disjuntores ultra rápidos do positivo* (extraíveis) – **DUR** – de protecção dos *feeders de corrente contínua* de ligação aos AS. O número deste tipo de celas depende do modo de exploração da rede de metro ligeiro e da forma como é feita a ligação dos AS à LCE. Eventualmente poderá existir uma cela de reserva.

Como referido anteriormente os **AS** podem estar instalados junto à via ou constituir uma cela adicional do QCC e destinam-se a realizar a ligação do “**positivo**” à LCE, a permitirem o paralelo entre vias e o *shunt* entre secções elementares da LCE, de acordo com as condições de exploração (ver Capítulo 3) e ao estabelecimento de eventuais *feeders auxiliares*.

São constituídos por *seccionadores e contactores*, para **isolamento e realização das manobras necessárias ao estabelecimento da configuração da alimentação** da LCE em função das condições de exploração.

5.6. Rede de Terras

As SET são dotadas de uma **rede de terras**, constituída por *uma malha de cabo de cobre nu, enterrado no solo, complementada por varetas de aço revestido a cobre (eléctrodo de terra)*, dimensionada de acordo com a norma *IEEE St.80-2000 – Safety in AC substation grounding*⁶.

5.7. Encravamentos e Comando e Controlo das SET

5.7.1. Encravamentos

Para além das protecções eléctricas a instalar nos QMT e QCC, os **sistemas eléctricos** (*média tensão e tracção*) são dotados de **encravamentos eléctricos e mecânicos e automatismos de segurança** a fim de **evitar falsas manobras** (*manobra de seccionadores em carga, fecho dos seccionadores de terra com os respectivos seccionadores de linha fechados ou com os disjuntores extraíveis inseridos e fechados, etc.*) e promover a protecção, quer dos equipamentos, quer dos operadores contra o risco de contactos directos com partes em tensão.

⁵ A ponte de Graetz é uma **ponte de díodos** que *converte corrente alternada monofásica em corrente rectificada, isto é, contínua*.

⁶ Embora a norma IEEE St. 80-2000 refira explicitamente que se aplica apenas a subestações exteriores (tipo AIS), é habitual utilizá-la para cálculo da rede de terras das SET.

No que se refere aos encravamentos mecânicos, estes serão realizados por meio de chaves próprias que, em alguns casos, poderão estar interligadas com o estado de outros equipamentos presentes. Cada SET tem um conjunto diferenciado, próprio e codificado de chaves.

Os **encravamentos eléctricos** destinam-se também a **impedir a realização de manobras não permitidas pela exploração da rede**, das quais se destacam:

- Paralelo de duas subestações da rede pública.
- Ligação simultânea dos *TT*, caso existam dois.
- Manobra dos seccionadores de linha com os *DUR*, respectivo e de reserva (caso exista), fechados.
- Fecho dos seccionadores de linha com os contactores de *bypass* fechados.
- Fecho dos contactores de *bypass* com qualquer um dos seccionadores de linha fechado.

5.7.2. Comando e Controlo

As *SET*, nas quais se consideram incluídos os *AS*, mesmo que implantados junto à via, são instalações “abandonadas”, supervisionadas e comandadas remotamente num *Centro de Controlo Operacional*, (**CCO**) através do sistema **SCADA** em modo de “telecomando” ou por intervenção do operador do *CCO*, no caso de ser necessário executar manobras de recurso.

Contudo, em cada *SET* existe um posto de comando e controlo local (**PCCS**), utilizado apenas para manutenção ou em caso de emergência.

A escolha entre comando local e telecomando poderá ser feita para a totalidade da *SET*, através de um selector instalado no *PCCS* ou de cada cela do *QMT* e do *QCC* através de um comutador colocado na respectiva unidade de comando, controlo e protecção (**IED**, acrónimo inglês de *Intelligent Electronic Device*), fornecendo assim uma prioridade local para as operações.

Por questões de segurança, as **ordens de disparo** das *unidades de protecção* dos *IED* do *QMT* **actuem directamente** sobre as *bobinas de disparo* dos respectivos disjuntores.

O *PCCS* tem como funções a gestão das comunicações com o *SCADA*, o controlo e supervisão de todos os equipamentos da *SET*, indicando todos os respetivos dados – eventos, estados, alarmes e telemedida das grandezas elétricas – e possibilitando o comando de todos os órgãos de manobra motorizados.

Esta possibilidade de comando individual permitirá, durante as operações de manutenção num equipamento, o normal funcionamento do telecomando para a restante parte das instalações.

Em qualquer situação de comando local, o operador do SCADA continua a receber informações sobre o estado dos equipamentos nas SET.

Embora os actuais *IED*, que são desenvolvidos para obedecerem ao estipulado na norma *IEC 61850 – Communication networks and systems for power utility automation*, permitam a comunicação directa com o *SCADA*, através de uma rede tipo Ethernet, com cabos em fibra óptica, é habitual que os sinais analógicos e digitais de cada *SET*

sejam concentrados no *PCCS*, ou no que também é habitual designar por **URT**. A Rede Ethernet é assim estabelecida com os *PCCS/URT*, como representa a Figura 3.

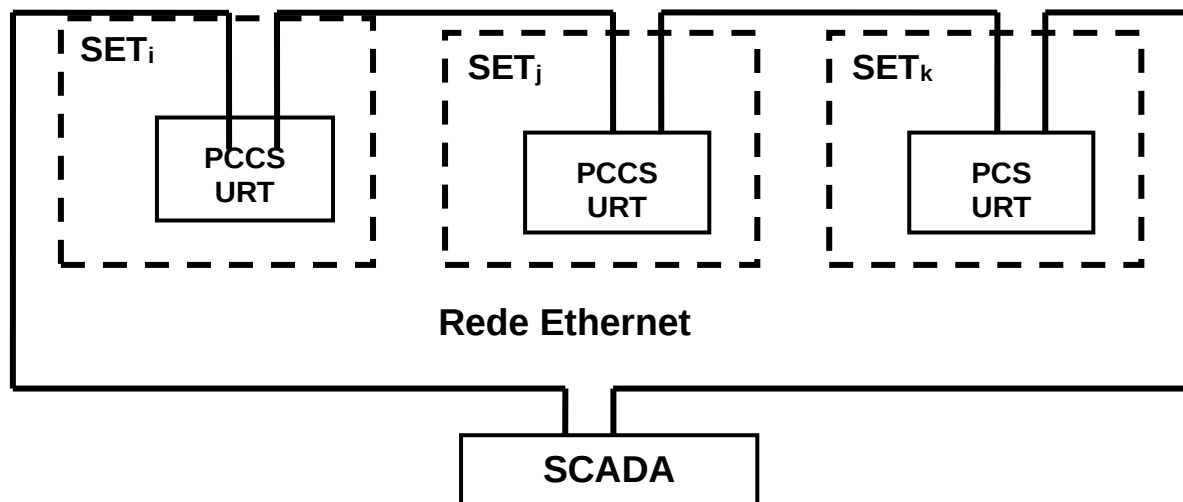


Figura 3 - Esquema simplificado das comunicações entre as SET e o SCADA
O comando e controlo das *SET* realiza-se através de *entradas e saídas digitais (ED/SD)* e *analógicas (EA/SA)*. Os *IED* das celas *DS* do *QCC* concentram as entradas e saídas dos *RT*, enquanto as entradas e saídas dos sistemas das *SET* que não têm *IED* (serviços auxiliares, sistema de AVAC, sistema automático de detecção de incêndios, etc.) dispõem de uma *URT* específica que é integrada no *PCCS*, como se representa na Figura 4.

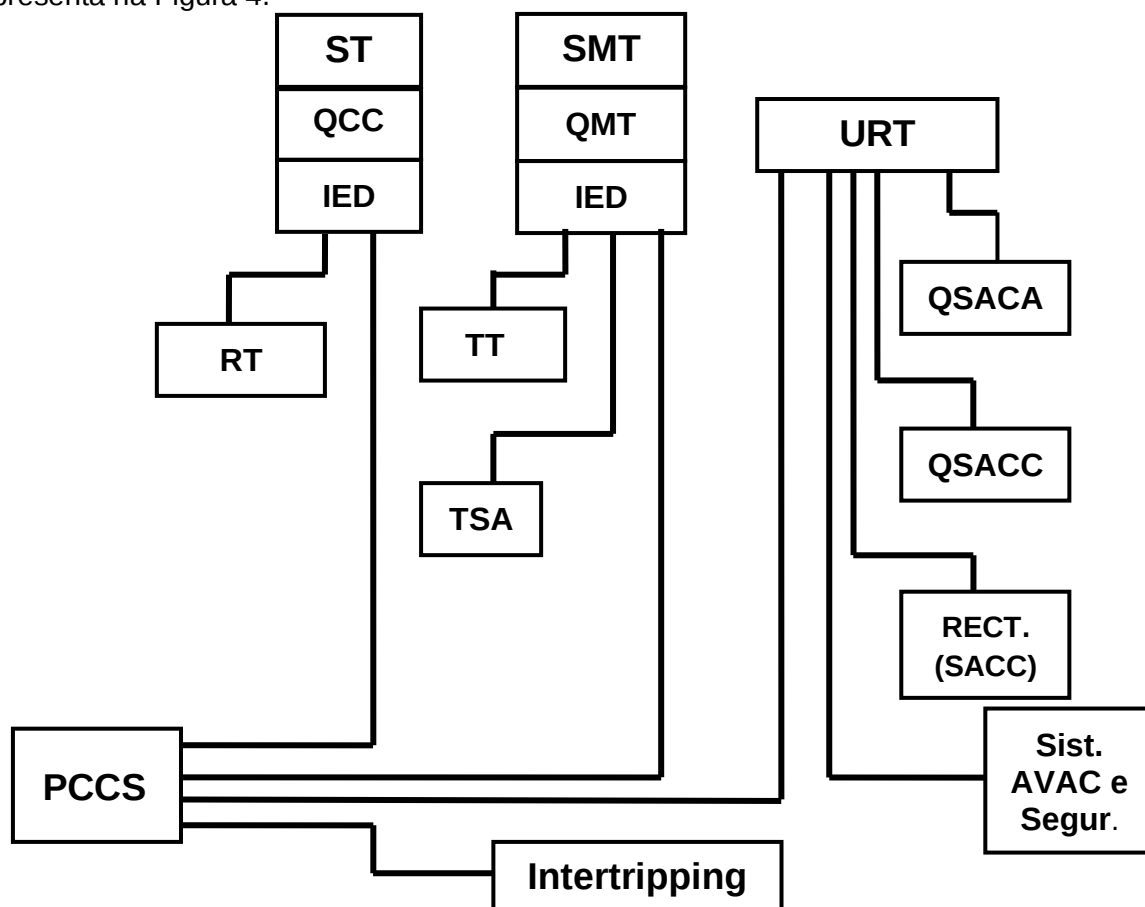


Figura 4 - Arquitectura tipo do sistema de comando e controlo de uma SET

Para além das protecções eléctricas instaladas nas celas do *QMT* e do *QCC*, existe ainda um *circuito de inter-disparo (intertripping)* entre *DUR*, cujo objectivo é o de assegurar que, quando o troço de linha estiver em defeito, seja desligada de imediato a sua alimentação eléctrica, mesmo quando actue a protecção de máxima corrente de um dos dois *DUR* que o alimentam ou, em casos extremos, quando intervém o relé de mínima tensão instalado junto a cada *SET*.

O circuito de interligação entre os disjuntores de duas *SET* contíguas será estendido automaticamente ao disjuntor da terceira *SET* no caso em que uma das duas fique fora de serviço e o equipamento de *bypass* instalado na *LCE* em frente à mesma esteja fechado.

6. ALIMENTAÇÃO DA LINHA DE CONTACTO

A alimentação da *LCE* é habitualmente do tipo **bilateral**, isto é, duas *SET* contíguas alimentam a mesma secção elementar.

Esta solução, em caso de avaria, permite isolar só uma parte da *LCE* entre a *SET* e as que lhe estão adjacentes, abrangendo a zona de avaria. Em caso de avaria numa *SET*, a alimentação será fornecida pelas duas adjacentes e a continuidade eléctrica da linha será garantida fechando o seccionador de *bypass* instalado no *AS*, colocado em paralelo com o isolador de secção.

Para poder alimentar separadamente duas secções da *LCE*, será instalado um **isolador de secção** na proximidade de cada *SET*.

A *LCE* pode ser alimentada a partir do *AS* por dois únicos *feeders* (caso em que o *QCC* apenas terá duas celas **DUR** e eventualmente uma de reserva), sendo feito um *shunt* permanente entre as *LCE* de cada uma das vias, como se representa na figura 5, colocando-as em paralelo, para diminuir as quedas de tensão devidas a uma maior distância entre as *SET* em condição de exploração **D1** (ver Capítulo 3).

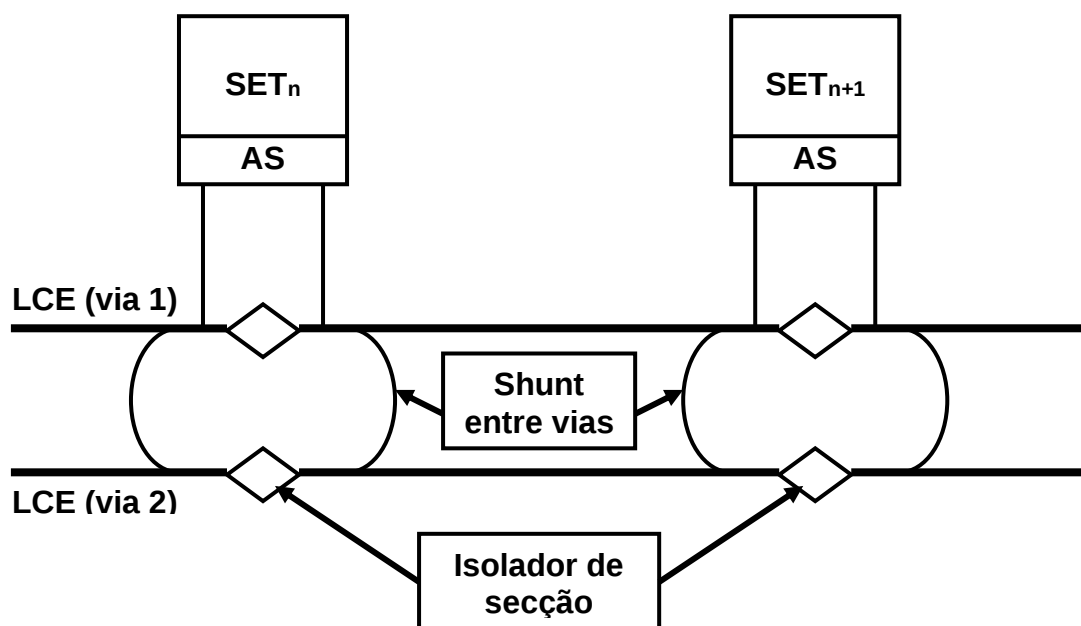


Figura 5 – Alimentação da LCE com apenas um feeder por secção elementar

A LCE pode ser alimentada a partir do AS por quatro *feeders* (um por via e por secção elementar, caso em que o QCC terá quatro celas **DUR** e eventualmente uma de reserva), sendo o paralelo entre as LCE feito através dos contactores de emergência colocados nos AS, como se representa na figura 6.

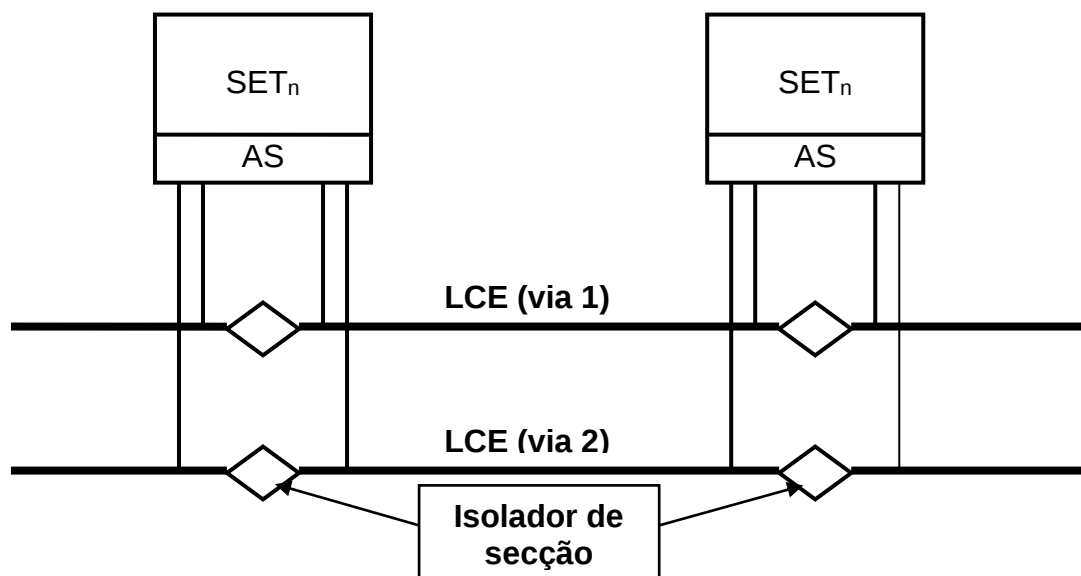


Figura 6 – Alimentação da LCE com dois feeders por secção elementar

7. LINHA DE CONTACTO

7.1. Considerações Gerais

Neste capítulo serão abordados, ainda que de forma resumida, os seguintes temas e componentes da LCE:

- Esquema eléctrico.
- Condutores da LCE.
- Apoios (poste, pórticos e postaletes) e respectivos acessórios e implantação (planta de piquetagem).
- Isoladores de secção.
- Sinalização de presença de tensão na LCE.
- Aparelhos de descarga (protecção contra sobretensões).
- Corte da LCE.
- Acessórios diversos (ferragens, mosquetões, manilhas, brincos e esticadores, abraçadeiras para fixação dos tirantes à consola, peças de suspensão (delta), pinças duplas e de arrumação, garfos para consolas, etc.).
- Terras.

A LCE e todos os equipamentos e materiais que a constituem devem estar de acordo com o estipulado nas *normas IEC 60913 – Railway applications – Fixed installations – Electric traction overhead contact lines* e *EN 50149 – Railway applications. Fixed installations. Electric traction. Copper and copper alloy grooved contact wires*, e obedecer ao RSLEAT.

Os **isoladores de secção**, cuja função foi analisada no Capítulo 6, são habitualmente constituídos por isoladores compósitos⁷ com núcleo reforçado com fibras de vidro e protegido com um invólucro de silicone, devendo obedecer ao estipulado na norma *IEC 61109 – Insulators for overhead lines – Composite suspension and tension insulators for a.c. systems with a nominal voltage greater than 1 000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria*.

7.2. Esquema Eléctrico

O esquema eléctrico é uma peça de projecto fundamental da *LCE*, retratando a sua alimentação, e nele são representados os seguintes elementos:

- Condutores da *LCE* (secções elementares).
- *SET* e *AS*.
- Isoladores de secção.
- Descarregadores de sobretensões.
- Zonas comuns da *LCE*.
- Plataformas das estações.
- Aparelhos de mudança de via (**AMV**), de forma esquemática.

Designa-se por **secção elementar** da *LCE* o troço compreendido entre dois isoladores de secção consecutivos (ver Figura 1 – Capítulo 2).

A **zona comum** da *LCE* é uma zona de transição entre dois lanços, cuja função é a separação mecânica desses troços (esta separação realiza-se por motivos construtivos). No sentido de não haver descontinuidade de captação de corrente por parte do pantógrafo, dois lanços da *LCE* consecutivos são montados lado a lado ao longo de vãos de transição.

A localização das *plataformas das estações* e das *SET/AS* é indicada por um sistema de referência do tipo **Pk Δ+xyz**, que define a distância do elemento em causa ao ponto definido como *origem da rede de metro ligeiro* e cuja referência é **Pk 0+000**.

⁷ Os **isoladores compósitos** são constituídos por dois materiais com propriedades físicas e químicas diferentes, por exemplo material cerâmico e um polímero (como a resina epoxy) que formam um novo material com características específicas.

A Figura 7 ilustra um excerto de um esquema eléctrico.

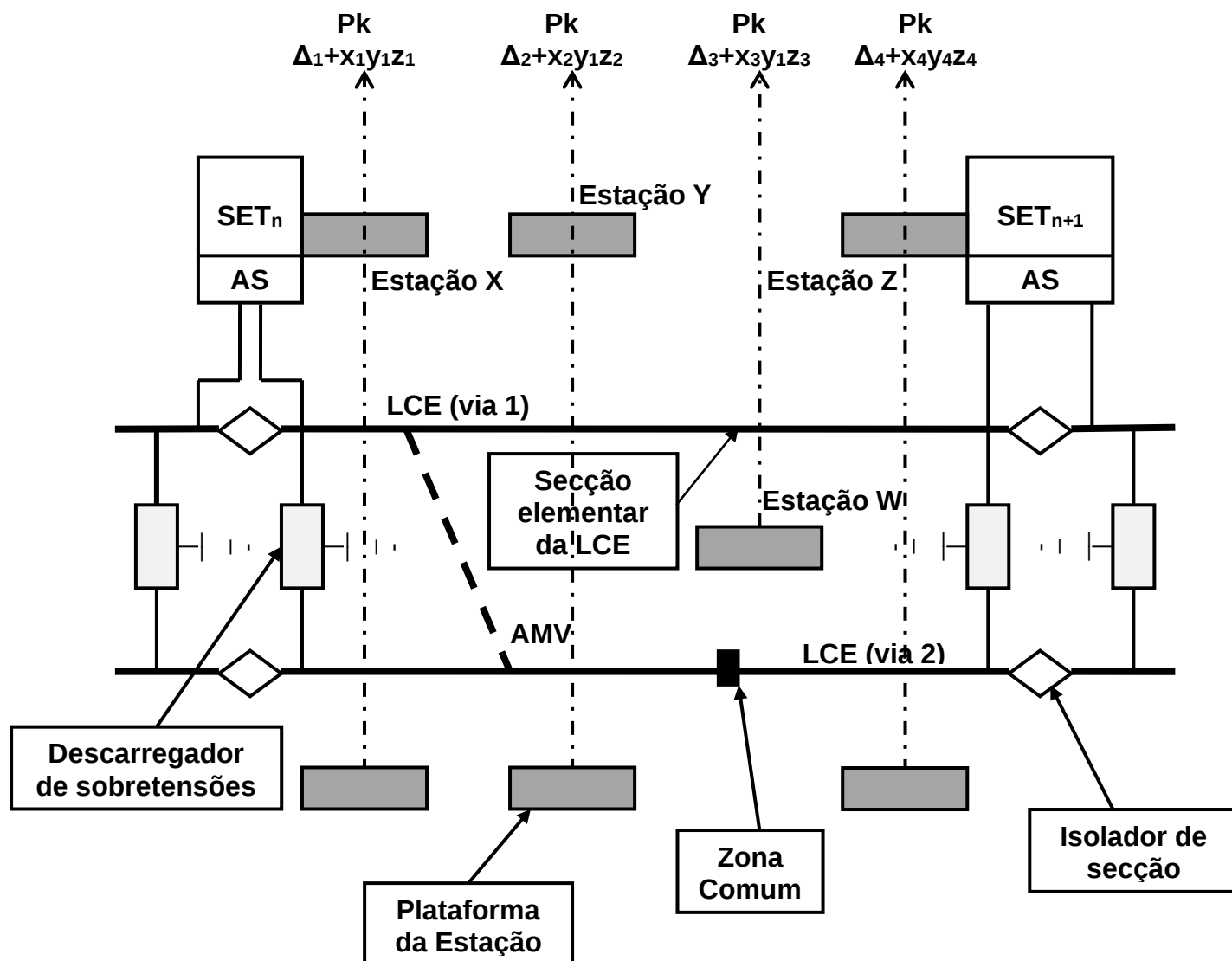


Figura 7 – Excerto de um esquema eléctrico

7.3. Condutores da LCE

Os condutores da LCE (habitualmente designados por **fios de contacto – FC**) são geralmente em *cobre electrolítico duro*, sendo os princípios de base do cálculo eléctrico os enunciados no Capítulo 3.

Nos *troços em superfície* a **altura dos FC acima do topo dos carris**, para uma tensão de **750 V CC** é em geral **5,60 m** nos *pontos de suspensão*, devendo ser garantida uma **altura mínima de 5,20 m**.

Nos *troços em túnel* a **altura mínima dos FC** é **3,80 m** e em eventuais passagens de nível **5,40 m**.

De acordo com o estipulado na norma IEC 60913 já referida anteriormente a **inclinação dos FC não deve exceder 10‰** para uma velocidade de **60 km/h** e a **variação de inclinação entre 2 vãos consecutivos não deve exceder metade do valor indicado anteriormente**.

Em *alinhamento recto*, o **desalinhamento dos FC** é de **300 mm** alternadamente para um e outro lado do eixo da via, com **desalinhamento zero no ponto intermédio**.

Em *curva*, o **desalinhamento dos FC** será no **máximo 250 mm**, para o exterior da curva, nos pontos de suspensão.

7.4. Apoios da LCE e Planta de Piquetagem

Os tipos de *apoio (postes)* dos **troços de superfície** da LCE, a sua disposição (**unilateral, bilateral oposição, axial, em pórtico flexível ou quinquêncio/zig-zag**), o espaçamento entre apoios e o acabamento final das superfícies é condicionado não só por aspectos técnicos (**dimensionamento dos apoios aos esforços de tracção**) mas também por aspectos de *integração urbana e paisagística*, e ainda pelo *layout* das estações e respectivas plataformas.

Todos estes aspectos devem ser integrados na definição do tipo de apoios e no seu dimensionamento.

A existência de curvas e AMV e a localização das SET condiciona também a localização e a distância entre apoios.

Estes apoios são em **aço, habitualmente do tipo S355JR⁸, galvanizado por imersão a quente, após fabrico, pintados ou não**, sendo vulgarmente utilizados perfis HEA/B e I e estruturas tubulares; em zonas onde não se revela exequível a montagem destes tipos de estruturas, a LCE é apoiada em **consolas fixadas às paredes dos edifícios**.

Nos **troços subterrâneos** os apoios da LCE são usualmente constituídos por **consolas fixadas às paredes dos túneis** ou por **postaletes** fixados à abóbada dos túneis. As consolas e postaletes são igualmente **em aço, habitualmente do tipo S355JR, galvanizado por imersão a quente, após fabrico, não sendo habitualmente pintados**.

As **características dos aços utilizados na fabricação dos apoios e o tratamento das superfícies devem obedecer** às seguintes normas:

- EN 10027 – Designation system for steels. Steel names
- EN 1090-1 – Execution of steel structures and aluminium structures. Requirements for conformity assessment of structural components
- EN 10051 – Continuously hot-rolled strip and plate/sheet cut from wide strip of non-alloy and alloy steels. Tolerances on dimensions and shape
- EN ISO 14713-2 – Zinc coatings -- Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel in structures -- Part 2: Hot dip galvanizing
- EN ISO 12944-5 – Paints and varnishes -- Corrosion protection of steel structures by protective paint systems -- Part 5: Protective paint systems
- ISO 2063 – Thermal spraying -- Metallic and other inorganic coatings -- Zinc, aluminium and their alloys

⁸ **Aço S355JR**: Aço laminado a quente, de acordo com as normas EN 10027 e 10051 e CR 10260 (CR: norma CEN – European Committee for Standardization) com tensões de ruptura $\sigma_R = 360-510 \text{ N/mm}^2$ (espessura nominal <3mm) e $\sigma_R = 360-510 \text{ N/mm}^2$ (espessura nominal $\geq 3\text{mm}$ e $\leq 100\text{mm}$).

Realça-se a importância da preparação das superfícies quer para galvanização, designadamente a decapagem, quer para a pintura de estruturas galvanizadas, designadamente o seu desengorduramento, devendo ser escrupulosamente seguidas não só as normas atrás referidas, mas também as instruções do fabricante da tinta.

As soldaduras devem obedecer ao estipulado nas normas *EN ISO 9606-1 – Qualification testing of welders. Fusion welding. Steels* e *15607 – Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. General rules*.

A localização dos apoios e o seu espaçamento são indicados na **planta de piquetagem**, onde se representam também os desalinhamentos dos *condutores da LCE* e as *zonas comuns*.

Em **plena via**, à superfície, as **suspensões** dos *condutores da LCE* são constituídas por **consolas e tirantes**, com *ligações articuladas aos postes*, ou através de **pórticos flexíveis**.

A *suspensão dos condutores da LCE* é habitualmente *ligada ao tubo das consolas ou aos pórticos flexíveis*, mediante suportes em **delta** em **alinhamento recto**, ou **braços de chamada em curva** (*associados, ou não, aos suportes em delta*).

Os *postes* são **fixados a maciços de betão armado** por meio de *flange e chumbadouros ou por encastramento*. Os **maciços devem obedecer** ao REBAP (*Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado*), aprovado pelo Decreto n.º 349-C/83 de 30 de Julho e às normas *NP EN 206-1 – Betão. Especificação, produção, desempenho e conformidade* e *EN 1991 – Eurocode 1: Actions on structures* e *1992 – Eurocode 2: Design of concrete structures*.

Os *postes* devem ser **marcados por meio de punção** com os seguintes elementos:

- *Identificação do fabricante.*
- *Identificação do lote de fabrico.*
- *Ano de fabrico.*
- *Tipo de poste.*

Nos apoios em que **existem equipamentos eléctricos**, tais como *armaduras de iluminação, armários de seccionadores e ligações à LCE*, serão instaladas **chapas de perigo de morte**, que obedecerão às Normas *NP-608 – Sinalização de segurança. Símbolo de tensão eléctrica perigosa* e *NP-609 – Sinalização de segurança. Sinais de tensão eléctrica perigosa*.

7.5. Sinalização de Presença de Tensão na LCE

Ao longo da *LCE* existem **sinalizadores de presença de tensão** nas respectivas *secções elementares, em correspondência com um isolador de secção, seja nos pontos de alimentação a partir dos AS seja nos pontos de seccionamento simples*.

O **comando destes sinalizadores** será efectuado *a partir de um contacto livre de potencial dos relés de tensão instalados nos armários de seccionadores*.

O dispositivo de sinalização é do **tipo luz monodireccional branca**, apresentando o seguinte “código” de sinalização, em relação ao estado de alimentação da secção elementar da LCE.

- **Luz branca fixa**, em caso de presença de tensão na *secção elementar*.
- **Luz branca intermitente**, em caso de ausência de tensão na *secção elementar*.
- **Luz apagada**, em caso de defeito do sinalizador ou do respectivo circuito de alimentação.

Em cada via será instalada uma lâmpada de sinalização, indicando o **estado da tensão da LCE da próxima secção elementar** e que deve ser **visível ao condutor do veículo proveniente do sentido de deslocação normal**.

7.6. Aparelhos de Descarga (Protecção Contra Sobretensões)

Nos troços em superfície das redes de metro ligeiro é habitual instalar, nos apoios onde se faz a alimentação da LCE a partir dos AS, **DST** para *protecção da linha contra sobretensões*, designadamente as de *origem atmosférica* para protecção da LCE, com uma corrente de descarga de **10 kA**, para uma *onda de choque 8/20 µs*, obedecendo ao estipulado na norma *EN 50526-1 – Railway applications. Fixed Installations. D.C. surge arresters and voltage limiting devices. Surge arresters*.

Os **DST** devem ser ligados à terra através de um eléctrodo de terra, usualmente varetas de aço revestido a cobre.

7.7. Corte da LCE

Para os **troços subterrâneos** da *linha de metro ligeiro* deverá existir um **sistema de corte** da LCE associado ao eventual *sistema de intervenção de combate a incêndios* instalado.

O **sistema de corte da linha aérea de contacto** actuará nos **DUR** das **SET** que alimentam o troço da LCE que se encontre na zona de incêndio.

As **caixas de corte e sinalização** devem ter uma *botoneira de corte manual* (por questões de segurança o contacto é **normalmente fechado**) e dois sinalizadores (*verde e vermelho*) sinalizando a presença (ou ausência) de tensão na LCE.

Em *correspondência com as secções eléctricas da LCE envolvidas no incêndio*, são colocadas **lâmpadas de luz fixa para indicar a presença ou não de tensão eléctrica**, de acordo com a seguinte definição:

- **Lâmpada vermelha**: presença de tensão na LCE.
- **Lâmpada verde**: as secções da LCE em causa não estão a ser alimentadas.

A existência de duas lâmpadas permite evitar interpretações incorrectas do sinal luminoso. Assim, no caso em que as duas lâmpadas estejam desligadas, significa uma anomalia no funcionamento dos relés de tensão ou nas mesmas.

7.8. Terras

Fazendo-se o **retorno de tracção através dos carris** é necessário *garantir que estes estejam isolados dos sistemas de terra de outros sistemas, por exemplo a rede de*

terras das SET, e de eventuais estruturas metálicas próximas, para limitar o efeito das correntes vagabundas (ver Capítulo 8.3).

Caso a tensão entre o carril e o sistema de terras da SET seja **superior aos limites admissíveis** pela norma EN 50122 – *Railway applications. Fixed installations. Electrical safety, earthing and the return circuit*, o **negativo de tracção** será ligado à terra de forma automática, por dispositivo existente no QCC, montado isolado da terra, através de **apoios isolados apropriados**.

Nas linhas urbanas a LCE deve ser de **classe de isolamento II** (isolamento duplo), pelo que **não é necessária uma ligação à terra dos respectivos apoios**, de acordo com o estipulado na norma IEC 61140 – *Protection against electric shock - Common aspects for installation and equipment*.

Não havendo estações em túnel no presente troço, os sistemas electromecânicos e seus equipamentos dispersos terão as suas redes próprias de terra de serviço e protecção, cujo âmbito está fora do objectivo do presente documento.

No caso de postes situados em paragens ou estações, onde eventualmente podem ser instalados outros equipamentos, pode prever-se a ligação à terra da plataforma da estação, dado a concepção de duplo isolamento o permitir.

De acordo com o estipulado na norma EN 50122-1 – *Railway applications. Fixed installations. Electrical safety, earthing and the return circuit. Protective provisions against electric shock*, as tensões de contacto máximas, em função do tempo, que devem ser garantidas na **zona de influência da LCE** são as seguintes:

- Regime permanente: 120 V CC
- 1 s até 300 s: 150 V
- 1 s: 170 V
- 0,1 s: 660 V
- 0,02 s: 940 V

Na Figura 8 representa-se a determinação da zona de influência da LCE.

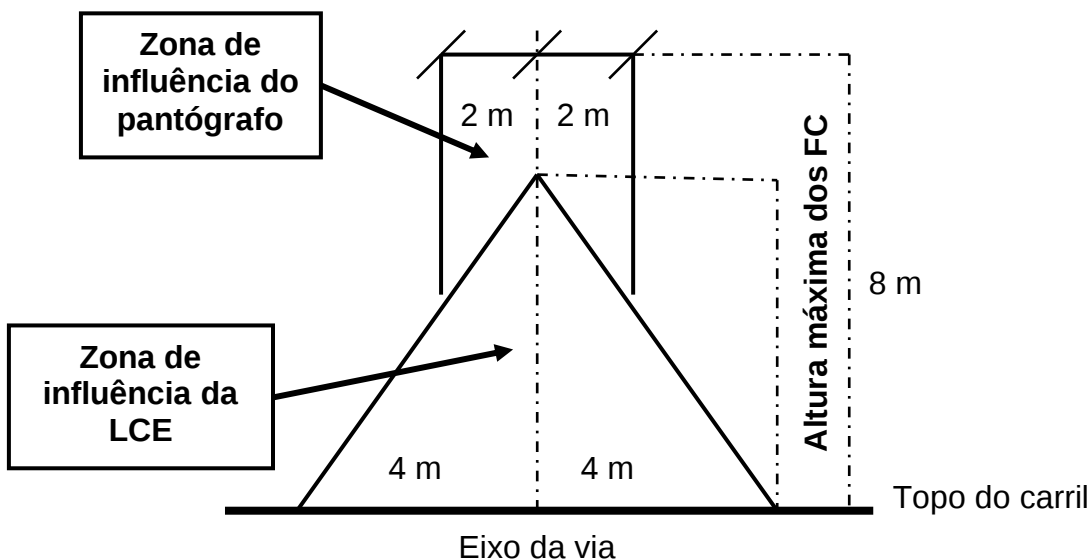


Figura 8 – Determinação da zona de influência da LCE

8. PROBLEMAS ESPECÍFICOS DOS SISTEMAS DE TRACÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

8.1. Considerandos de Base

Os sistemas de tracção eléctrica em corrente contínua apresentam alguns problemas específicos que interferem com outros equipamentos, redes e estruturas que se encontram na sua vizinhança, sendo os mais habituais e, consequentemente, os que mais preocupam o projectista:

- Injecção de harmónicas na rede pública de alimentação MT das SET.
- Correntes vagabundas.

8.2. Harmónicas

Além das harmónicas geradas por definição do RT, os grupos de tracção eléctrica dodecafásicos, os mais habitualmente utilizados, geram tipicamente corrente harmónica nas frequências de ordem 5ª, 7ª, 17ª e 19ª que resultam de valores práticos devido a *desequilíbrios dos díodos (tolerâncias)* e impedâncias das redes. *Teoricamente inexistentes, estes valores têm pequena magnitude, pelo que em condições normais de fabrico do equipamento e de funcionamento das redes de distribuição, terão contribuição marginal, desde que não exista ressonância em torno dessa frequência.*

Numa rede eléctrica a **distorção provocada pelas harmónicas** é caracterizada pelo parâmetro **THD** (sigla inglesa de *Total Harmonic Distortion – Distorção Harmónica Total*), que é calculado pela expressão:

$$\text{THD} = \frac{U_h}{U_1} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1}$$

Onde U_1 representa a tensão à frequência fundamental e U_i a harmónica de ordem i da tensão.

De acordo com a norma IEC 61000-2-4 – *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-4: Environment – Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*, os pontos de ligação à rede pública de fornecimento de energia dos consumidores com as **características da rede de tracção** em causa devem **cumprir os requisitos da classe 2 para as componentes de tensão harmónica de ordem impar (exclui múltiplos de 3)**.

Ainda de acordo com a mesma norma, **os grupos de tracção eléctrica dodecafásicos** geram teoricamente os **valores de corrente harmónica, a 50% e 100% da carga**, considerando a **potência de curto-circuito máxima da rede de 500MVA**, e um factor de acoplamento entre os enrolamentos de BT do transformador de tracção de **mínimo 0,8** indicados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores teóricos de corrente harmónica gerada por grupos dodecafásicos

Frequência (f) de Ordem n	11	13	23	25
%Inf (a50%In)	7	5,5	1,5	1,2
%Inf (100%In)	5	3,5	1	1

Em termos das recomendações actuais, a *compatibilidade entre duas redes é garantida pela THD*, que se refere às **tensões harmónicas em percentagem da fundamental**. Devem calcular-se as *impedâncias harmónicas nas frequências específicas da rede, sendo o produto destas pelas correntes respectivas, o resultado que importa analisar*.

8.3. Correntes Vagabundas

Correntes vagabundas, *contínuas ou alternadas*, são as **correntes que se desviam do seu percurso normal, indo por percursos onde encontram menores resistências**. Normalmente, os *percursos eléctricos alternativos, com menores resistências, envolvem estruturas metálicas soterradas, tais como, armaduras de estruturas betão armado e tubagens metálicas*.

A *existência de correntes vagabundas* conduz, em muitos casos, a **problemas de corrosão motivados pelo facto de a corrente ao procurar um caminho alternativo ser obrigada a entrar e a sair de várias estruturas (metálicas), onde os transportadores da corrente são os electrões, e a percorrer percursos inorgânicos (solos), onde os transportadores de corrente são os iões**. Esta *alteração de transportadores, electrões para iões e vice-versa*, implica, necessariamente, **semi-reacções de oxidação (corrosão) e semi-reacções de redução**. Nos locais onde a corrente de iões dá lugar a uma corrente de electrões (*locais onde a corrente abandona as estruturas metálicas*) são os locais onde se verifica os fenómenos de corrosão.

Apesar de tal fenómeno acontecer com corrente contínua e com corrente alternada, o fenómeno é muito mais gravoso quando a corrente é contínua.

Neste tipo de instalação é frequente utilizarem-se os carris para efectuar o retorno da corrente. Assim, se a *resistência eléctrica dos carris for mais elevada que a resistência eléctrica de outras estruturas vizinhas a corrente terá tendência a ser transportada nessas estruturas com o surgimento de locais de corrosão nos carris e nas estruturas vizinhas*.

As formas de **minimizar os efeitos corrosivos** vão no sentido de *evitar o surgimento de correntes vagabundas*. Desta forma, as **resistências associadas ao normal retorno da corrente deverão ser minimizadas enquanto as resistências associadas a retornos alternativos, geradoras de correntes vagabundas, deverão ser maximizadas**.

Concretamente, deve-se procurar:

- a) *Diminuir a resistência associada ao retorno da corrente;*
- b) *Aumentar a resistência entre o circuito de retorno e a terra;*
- c) *Aumentar a resistência entre a terra e estruturas metálicas enterradas (tubagens,*

armaduras);

d) Aumentar a resistência das estruturas metálicas enterradas.

As **medidas preventivas a implementar** aplicam-se a todos os troços onde os carris se encontram envolvidos por estruturas de betão (caso de um viaduto), bem como todos os troços que cruzem ou corram paralelos à tubagem de terceiros.

As medidas em questão são:

1) Isolamento eléctrico dos carris com a terra;

2) Diminuição da resistência entre carris;

3) Diminuição da tendência de retorno da corrente pelas armaduras da estrutura de betão armado.

9. FRENAGEM E RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

Para obviar aos problemas levantados pela instalação da *LCE* e respectivos apoios nos centros históricos das cidades ou em zonas com arruamentos estreitos e com forte densidade de edificações, é possível recuperar a **energia de frenagem** dos motores eléctricos das composições e utilizá-la para a alimentação das composições, dispensando-se desta forma a instalação da *LCE* naquelas zonas.

Esta solução, que já está implantada em algumas cidades europeias e da China, recorre à utilização de **super-condutores**, um dos métodos de armazenamento de energia eléctrica que tem vindo a ser desenvolvido.

Os **super-condensadores** são *condensadores electroquímicos* que têm esta designação pelo facto de, para a mesma forma e dimensões, terem uma *capacidade* muito superior à dos *condensadores electrolíticos*, tal facto significando que podem armazenar uma maior quantidade de energia eléctrica do que os *condensadores habituais*, com **menores dimensões e massa** (a *relação por unidade de volume ou de massa* entre a energia armazenada nos *condensadores habituais* e nos *super-condensadores* varia, de acordo com o *material dieléctrico* utilizado entre **1 para 10** e **1 para 100**).

ⁱ Engenheiro Electrotécnico – Energia e Sistemas de Potência (IST – 1974)
Consultor em Subestações e Formador Profissional

O Autor **não** utiliza o Novo Acordo Ortográfico