

Redes de corrente constante

HERMÍNIO DUARTE-RAMOS

Dr. Eng.^o Electrotécnico

1. INTRODUÇÃO

Os circuitos de corrente alternada geralmente são caracterizados por manterem a *tensão constante*, definindo-se tolerâncias em torno dos valores nominais normalizados, por exemplo, $\pm 5\%$ junto dos receptores de utilização e $\pm 10\%$ em pontos das redes de transporte mais próximos das centrais de produção. Qualquer receptor tem portanto aos seus terminais praticamente a mesma tensão, sendo percorrido por uma intensidade de corrente dependente do valor da sua potência activa e do factor de potência. Nestas condições, admitindo que a rede funciona com um factor de potência limitado a pequenas variações, a corrente I apenas depende da potência P , sendo a tensão U constante, numa relação de proporcionalidade directa.

Mas conceberam-se circuitos eléctricos em que a fonte de alimentação conserva a *intensidade de corrente constante* em todo o circuito, sendo por conseguinte variável a tensão dos terminais de cada receptor, consoante a sua potência. Neste caso, como I é constante, U varia directamente proporcional a P .

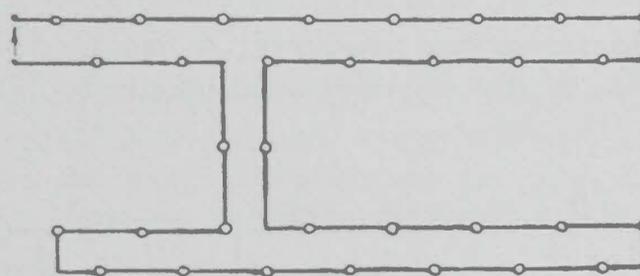
Este tipo de redes a corrente constante foi alvo de larga aplicação nos Estados Unidos da América, após a segunda guerra mundial, em circuitos de iluminação de arruamentos citadinos. Hoje porém a sua preferência restringe-se aos circuitos de iluminação das pistas dos aeroportos, como são exemplo todos os aeroportos em Portugal.

Da experiência colhida em vários anos de trabalho nas obras a cargo da Aeronáutica Civil, sobretudo aquando das instalações dos aeroportos da Portela em Lisboa, Pedras Rubras no Porto, Faro e Sal, coordenamos este escrito que ora se divulga na certeza da sua utilidade a quem prossiga tais tarefas, quer em Portugal (por exemplo como o novo aeroporto internacio-

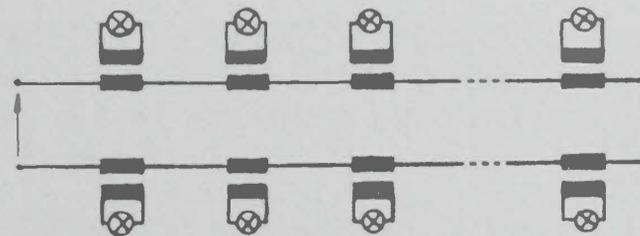
nal de Lisboa), quer na África de expressão portuguesa (caso dos aeródromos de Nova Lisboa e da Catumbela, em Angola). A par de considerações práticas registadas da experiência vivida esboçam-se os fundamentos teóricos das soluções preconizadas ao longo da evolução tecnológica e que os anos de pesquisa e estudo nos proporcionaram resumir.

2. APLICAÇÕES DOS CIRCUITOS A CORRENTE CONSTANTE

As redes a corrente constante começaram por se utilizar na *iluminação pública* (fig. 1a), por exemplo,



a)



b)

Fig. 1 — Esquemas de aplicação das redes de corrente constante
a) Iluminação pública
b) Ajudas visuais à navegação aérea

nas ruas de Milão, na Itália e de S. Paulo, no Brasil, tendo tido grande difusão sobretudo nos E. U. A. Neste serviço os receptores são grupos de lâmpadas iguais ligadas em série, instaladas ao longo dos arrua-

mentos, interligando-se estes grupos também em série de modo a economizar-se o condutor tanto quanto possível. Se uma lâmpada se funde o circuito interrompe-se instantaneamente e surge um aumento de tensão que faz funcionar um relé com a finalidade de curto-circuitar a lâmpada fundida, pondo-a fora de serviço e dando continuidade ao circuito série. Ao mesmo tempo a fonte de alimentação reduz a tensão de saída para que se conserve constante a intensidade de corrente, visto que a impedância da carga foi diminuída.

Devido à complexidade desta instalação o uso do sistema reduziu-se à *sinalização luminosa* das pistas de aeroportos (fig. 1b), porquanto o sistema série permite, pela sua segurança e uniformidade óptica, satisfazer da melhor maneira as exigentes condições de serviço na aterragem de aeronaves. Cada lâmpada é alimentada por um transformador de isolamento, que isola galvanicamente a lâmpada do circuito série e assegura a continuidade deste quando a lâmpada se funde, solução que substitui com vantagem, pela segurança embora à custa de maior preço, a acção do relé inicialmente concebido na iluminação urbana.

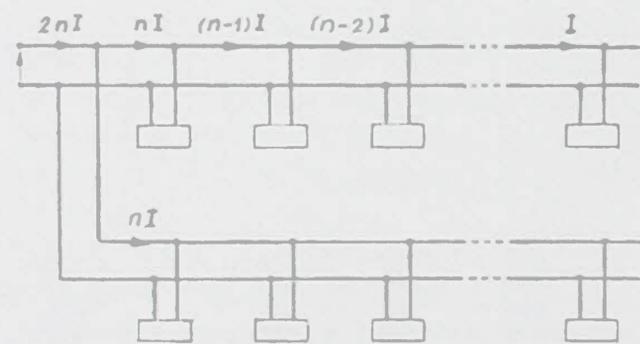
3. COMPARAÇÃO DOS CIRCUITOS A TENSÃO CONSTANTE E A CORRENTE CONSTANTE

Porque as redes a corrente constante apresentam propriedades distintas, que confundem quem está habituado a raciocinar em termos de rede a tensão constante, convém observar comparativamente os dois casos.

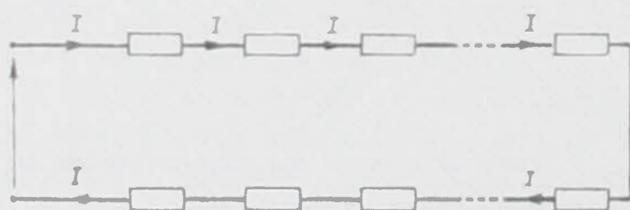
I — Rede a tensão constante

a) Características gerais: Este tipo de rede caracteriza-se por ter a tensão de alimentação constante, estando normalizados os valores nominais de 220 V / 380 V, pois é a baixa tensão que geralmente se usa na iluminação.

b) Montagem dos receptores: A ligação dos aparelhos de carga dos circuitos de alimentação faz-se em paralelo (fig. 2a).



a)



b)

Fig. 2 — Esquema de montagem de receptores (caso de cargas iguais)
a) Na rede de tensão constante
b) Na rede de corrente constante

c) Corrente nos condutores de alimentação: Como as cargas estão em derivação ao longo das linhas gerais a intensidade de corrente é sucessivamente decrescente (fig. 2a).

d) Tensão aos terminais dos receptores: Aparte quedas de tensão insignificantes as tensões nos receptores são iguais à tensão de alimentação da rede.

e) Protecção geral: Como a corrente total é dada pela expressão (visto que as cargas são óhmicas puras)

$$I_t = \frac{\Sigma P}{U}$$

atingindo-se normalmente algumas centenas de ampère, a protecção geral faz-se para elevada corrente e baixa tensão.

f) Protecção individual das cargas: Cada carga em derivação deverá possuir a sua protecção individual por fusível, pois assim em caso de avaria numa delas se evita a intervenção da protecção geral (que a executar-se colocaria todo o sistema inoperante).

g) Isolamento dos condutores: Os cabos de alimentação serão evidentemente isolados para baixa tensão, portanto relativamente baratos.

h) Secção dos condutores: Os condutores são dimensionados para elevada corrente, havendo por conseguinte desaproveitamento da secção à medida que se afasta da alimentação, pois reduzir a secção não convém visto exigir nova protecção.

i) Grandes comprimentos: Nas pistas de aeroportos modernos, com vários quilómetros de extensão, teriam de existir postos de transformação para se poder usar a baixa tensão na alimentação das lâmpadas, e portanto também uma rede de cabos de alta tensão.

j) Natureza da carga: O sistema funciona igualmente bem com receptores de potências diferentes, podendo aplicar-se na alimentação de lâmpadas em paralelo com motores potentes.

k) Caso de um receptor fora de serviço: A interrupção da alimentação a um receptor não interfere na alimentação dos restantes receptores, dado que a continuidade das linhas gerais se mantém.

l) Caso de curto-circuito: Na situação de avaria por curto-circuito a fonte de alimentação é sujeita a uma sobreintensidade da corrente eléctrica, que surge quando a tensão se anula no circuito. Daí a necessidade de uma protecção contra curto-circuitos. Este facto implica dois inconvenientes: provoca a interrupção geral do sistema e pode haver perigo de incêndio pelo arco eléctrico estabelecido no local da avaria.

m) Caso de circuito-aberto: Na abertura do circuito a fonte de alimentação nada sofre, interrompendo-se unicamente o serviço dos receptores a jusante do ponto de avaria.

n) Caso de carga constituída por lâmpadas: Trata-se de uma carga de natureza óhmica pura. A duração das lâmpadas é menor que na rede de corrente constante, porque a tensão que as alimenta é maior (seja 220 V para 200 W e 0,91 A). O rendimento das lâmpa-

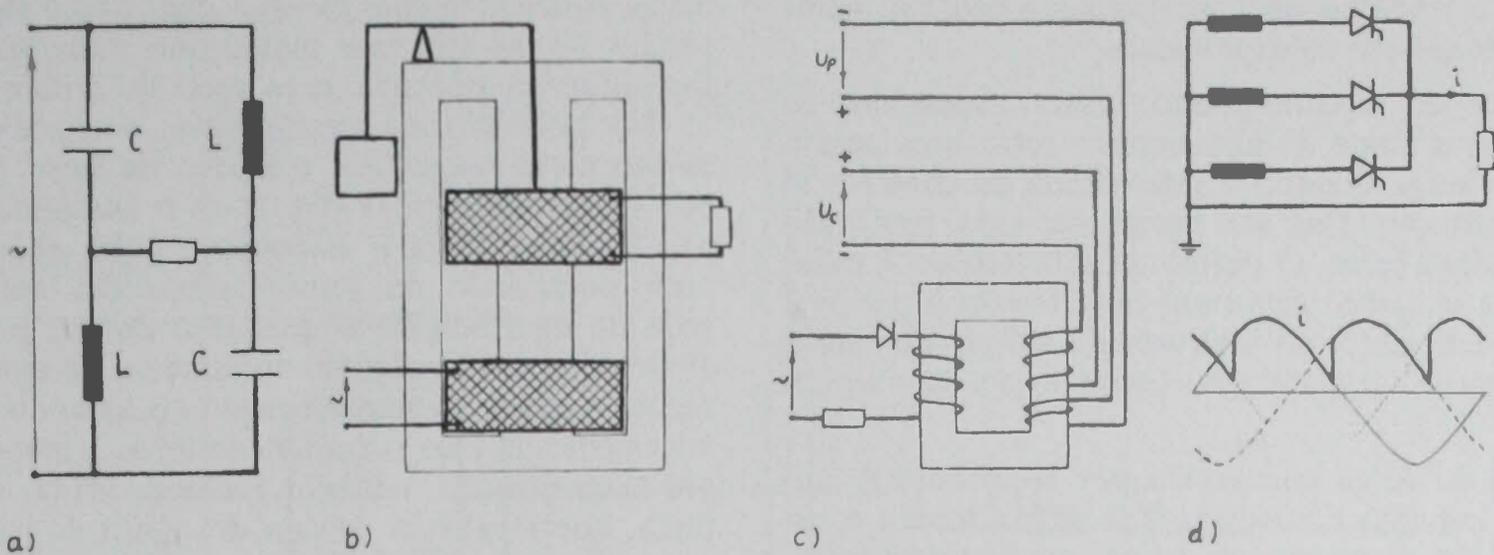


Fig. 3 — Esquemas de princípio dos transformadores de corrente constante
a) Ponte de Boucherot (ressonância)
b) Transformador de bobina móvel (electrodinâmico)
c) Elemento transdutor (amplificador magnético)
d) Tiristores em ligação trifásica de ponto médio (semi-condutores)

das é menor, pela mesma razão. A intensidade luminosa é diferente de lâmpada para lâmpada, dependendo das quedas de tensão, porquanto a intensidade luminosa de uma lâmpada incandescente é proporcional à potência 3,5 da tensão de alimentação (se, por exemplo, a tensão aos terminais da lâmpada decresce de 5% o fluxo luminoso reduz-se de 16%). Para se efectuar a regulação do brilho é preciso um dispositivo que varie a tensão. A corrente de entrada em serviço pode ser muito intensa, pois a resistência de uma lâmpada fria é cerca de dez vezes menor que a da lâmpada quente, e assim poderá provocar a acção da protecção geral, apesar de se tratar de uma sobreintensidade de curta duração; além disso esta corrente intensa reduz a duração de vida das lâmpadas devido a esforços térmicos e dinâmicos impostos aos filamentos.

II — Rede a corrente constante

a) Características gerais: Neste tipo de rede verifica-se uma intensidade de corrente constante em todo o circuito, sendo usuais os valores nominais de 6,6 A, 10 A e 20 A.

b) Montagem dos receptores: Os aparelhos de carga são ligados em série no circuito de alimentação (fig. 2b).

c) Corrente nos condutores de alimentação: como as cargas se encontram em série ao longo da linha de alimentação a intensidade da corrente é igual em todos os pontos (fig. 2b).

d) Tensão aos terminais dos receptores: cada receptor apresenta aos seus terminais uma tensão dependente da sua potência. Por isso no caso dos receptores possuírem a mesma potência as tensões aos seus terminais são iguais.

e) Protecção geral: Como a tensão total, verificada aos bornes da fonte de alimentação, é dada pela expressão seguinte (supondo as cargas resistivas puras)

$$U_t = \frac{\Sigma P}{I},$$

atingindo-se normalmente alguns milhares de volt,

a protecção geral é prevista para baixa corrente e elevada tensão.

f) Protecção individual das cargas: No sistema série dispensa-se a protecção individual de cada receptor pois a avaria é eliminada do circuito pelo próprio dispositivo que o alimenta individualmente, em geral um transformador de isolamento.

g) Isolamento dos condutores: Porque se atingem altas tensões os condutores devem ser isolados para alta tensão, nomeadamente até à máxima tensão imposta pela totalidade da potência inserida em série, havendo por consequência subaproveitamento do isolante à medida que se afasta da alimentação, pois reduzir o nível de isolamento não convém por complicar a montagem e o fabrico do cabo. O perigo da alta tensão é reduzido com o uso de cabos enterrados e pondo um dos seus pontos à terra para definição de potenciais.

h) Secção dos condutores: Os cabos são dimensionados para baixa corrente, o que provoca apreciável economia de cobre, compensando em parte o agravamento de custo do isolante e da fonte de alimentação.

i) Grandes comprimentos: Como as quedas de tensão não interferem no funcionamento dos receptores dispensam-se postos de transformação nos circuitos muito extensos.

j) Natureza da carga: Convém que os receptores tenham praticamente a mesma potência; de facto as lâmpadas são em geral de potência igual ou da mesma ordem de grandeza.

k) Caso de um receptor fora de serviço: Tal situação exige um dispositivo que retire o receptor avariado do circuito para lhe dar continuidade, processo que encarece muito a instalação.

l) Caso de curto-circuito: Num defeito por curto-circuito a fonte de alimentação nada sofre, havendo apenas uma ligeira alteração da tensão total por se ter modificado a impedância e portanto a potência global. O sistema série ainda tem a vantagem de o isolamento do circuito não sofrer prejuízo pelo curto-circuito, o

que reduz o trabalho de manutenção e oferece maior qualidade de serviço na exploração.

m) Caso de circuito-aberto: Interrompendo-se o circuito série a fonte de alimentação sofre uma sobretensão, que surge quando a intensidade de corrente se anula no circuito. Daí ser necessária uma protecção contra circuito-aberto. O perigo de sobretensão é reduzido porque os cabos suportam uma tensão superior à nominal (duas vezes) no intervalo de tempo em que a fonte não corta a alimentação (máximo de dois segundos).

n) Caso de carga constituída por lâmpadas: A duração das lâmpadas é maior que na rede a tensão constante visto que se podem ter baixas tensões de funcionamento (seja 10 V para 200 W e 20 A). O rendimento das lâmpadas é maior, pela mesma razão. A intensidade luminosa de todas as lâmpadas é igual, e por conseguinte o brilho também é o mesmo, por muito afastadas que elas estejam entre si, além de ser independente das quedas de tensão, ou seja, do comprimento dos cabos, o que significa maior segurança no caso dos aeroportos, característica que é tão fundamental como decisiva na escolha do tipo de circuito. A corrente é sempre limitada ao valor nominal, sendo o brilho desejado atingido progressivamente quando o circuito entra em serviço, evitando-se sobretensões de ligação, o que aumenta a duração de vida das lâmpadas e portanto oferece ainda maior economia na exploração e melhor segurança.

4. FONTES DE CORRENTE CONSTANTE

Na alimentação dos circuitos série utilizam-se os impropriamente chamados *transformadores de corrente constante*, que são reguladores concebidos para debitarem sempre o mesmo valor da intensidade de corrente qualquer que seja a impedância do circuito série alimentado, desde o curto-circuito até à plena carga. Estes aparelhos podem funcionar com base em diversos princípios, sucessivamente desenvolvidos ao longo do tempo: ressonância, electrodinâmico, amplificador magnético e tiristor.

Um transformador de corrente constante baseado no *princípio da ressonância* não possui órgãos em movimento, servindo-se das condições de ressonância entre duas bobinas e dois condensadores na chamada ponte de Boucherot (fig. 3a), tal que $\omega^2 LC=1$, donde se deduz o valor eficaz $I=\omega C U$, quer dizer, a intensidade de corrente apenas depende do valor das capacidades C . Deste modo a regulação da corrente, sendo a tensão aplicada U constante, consegue-se pela variação das capacidades da ponte. Estes primitivos aparelhos tinham portanto uma regulação descontínua.

O *princípio electrodinâmico* veio possibilitar uma regulação contínua. Num transformador de corrente constante deste tipo (fig. 3 b) existe um núcleo magnético com um enrolamento primário fixo e um enrolamento secundário móvel, o qual se desloca para cima e para baixo conforme o equilíbrio das forças electrodinâmicas entre as bobinas e um contrapeso. O circuito magnético tem a mesma disposição que num transformador de potência tipo couraçado, sendo no entanto o núcleo suficientemente mais largo para permitir uma separação aceitável dos enrolamentos, além de que o funcionamento se faz com uma indução mag-

nética suficientemente elevada para que o fluxo de dispersão no núcleo seja maior que num vulgar transformador de potência para rede de tensão constante.

No *princípio do amplificador magnético*, baseado na saturação magnética, o núcleo de ferro é envolvido por três enrolamentos (fig. 3 c): o enrolamento principal, ligado à carga e alimentado pelas alternâncias de uma polaridade da tensão sinusoidal aplicada pela rede de distribuição, o que se consegue por meio de diodos de rectificação; o enrolamento de comando, que regula o estado de magnetização do ferro do núcleo por intermédio de uma corrente contínua; o enrolamento de pré-magnetização, também sob uma dada tensão contínua, que localiza a origem do ponto de trabalho (em repouso e sem aplicação da tensão de comando) na zona do cotovelo inferior da curva de magnetização, evitando-se assim a necessidade de inversão da polarização no circuito de comando. Na prática um transdutor é formado por dois destes elementos em montagem anti-paralela (fig. 4), pois se conseguem então obter elevados valores da corrente constante com uma pequena corrente de polarização a partir do aproveitamento de ambas as alternâncias da tensão sinusoidal aplicada. Quando as potências são reduzidas usa-se o arrefecimento por ar, mas acima de 10 kW o arrefecimento executa-se por óleo devido a razões evidentes de disrupção.

Hoje, com o desenvolvimento dos semicondutores, prefere-se o *princípio dos tiristores*, pois se reduz muito o espaço ocupado, simplifica-se a manutenção e consegue-se notável economia na instalação: uma simples tensão de comando do grupo de tiristores, variando o instante de comutação, permite regular a corrente de saída de um modo fácil e eficiente (fig. 3 d).

5. CONSTITUIÇÃO DOS CIRCUITOS SÉRIE

A aplicação mais generalizada das redes de corrente constante encontra-se na alimentação dos circuitos das ajudas visuais à navegação aérea nos aeroportos (fig. 4). Como nesta aplicação existem diferentes circuitos (linhas de aproximação, soleiras, centro de pista, laterais de pista, caminhos de circulação, etc.) pode utilizar-se a mesma fonte de alimentação para mais de um circuito intercalando um *selector de circuitos* à saída da fonte, desde que a carga total não exceda a carga nominal da fonte e sempre que o brilho das respectivas lâmpadas possa ser igual em cada instante (por exemplo, centro de pista e suas laterais). Para se alimentar um determinado circuito ter-se-á então de começar por ligar a respectiva fonte, com os terminais curto-circuitados pelos manobreadores do selector, e depois a selecção do circuito pretendido consegue-se pela abertura do correspondente aparelho de manobra no selector de maneira a alimentar-se então a carga em série.

O *cabo de energia* em geral montado nos circuitos série é constituído por um condutor de cobre isolado a neopreno, que lhe confere elevada resistência aos agentes climáticos e orgânicos, permitindo uma longa duração de vida sob o solo. As secções nominais mais frequentes são de 6 e 8,3 ou 10 mm², sendo a tensão de isolamento para 5000 V, pois a tensão de serviço atinge normalmente valores acima de 1000 V conforme a potência da carga (um valor máximo usual é de 3000 V). Em caso de defeito por circuito-aberto

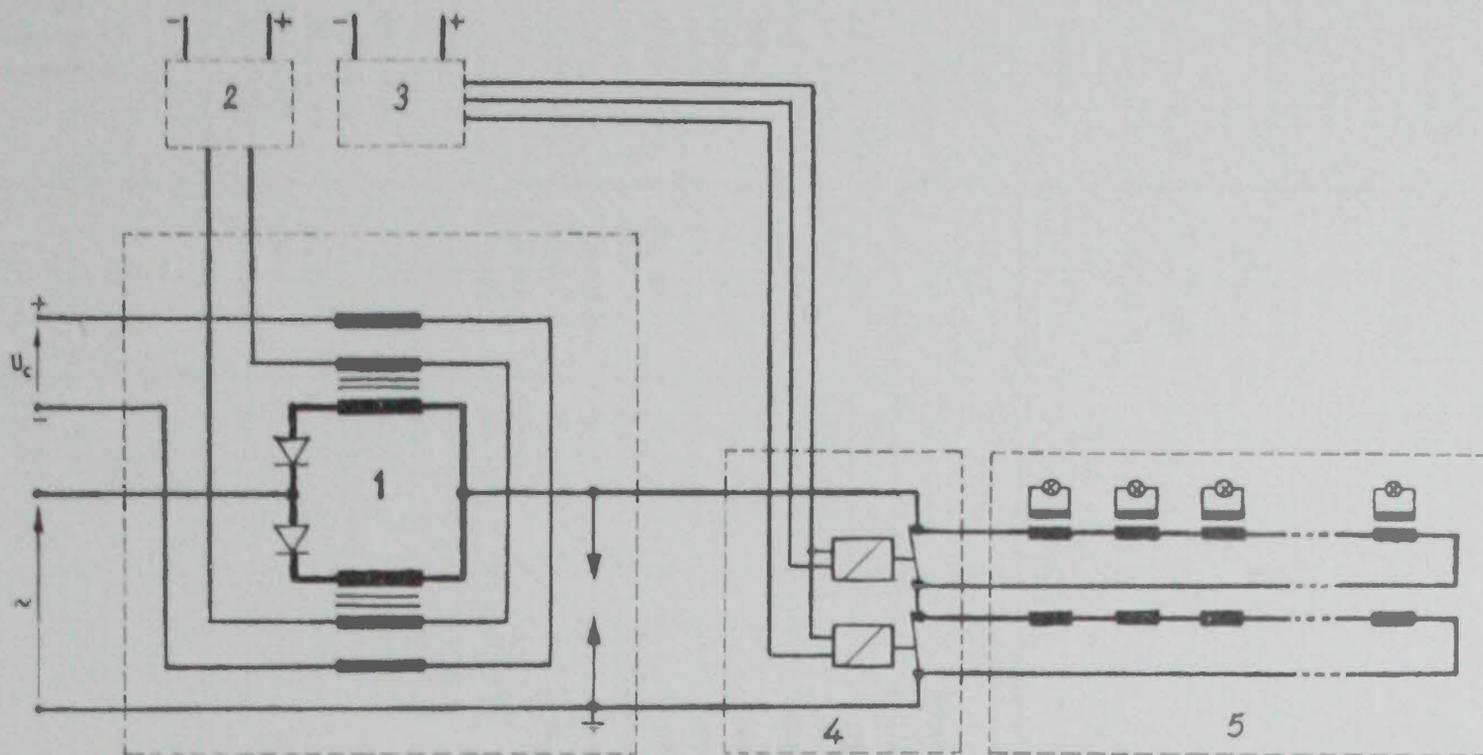


Fig. 4 — Esquema de princípio de uma instalação de corrente constante
(1 — transdutor; 2 — painel de regulação; 3 — painel de comando
4 — selector de circuitos; 5 — circuitos série)

uma sobretensão brusca aos terminais da fonte faz actuar as protecções gerais após um intervalo de tempo máximo de dois segundos, pelo que o cabo terá de suportar os respectivos efeitos.

As lâmpadas de um circuito série são alimentadas directamente pelo secundário de um *transformador de isolamento*, que retira a sua interferência no condutor geral quando fundirem os seus filamentos. Os transformadores de isolamento são monofásicos, de dois enrolamentos, sendo o primário percorrido pela corrente constante do circuito série e o secundário por uma corrente também constante correspondente ao valor nominal, por exemplo, 6,6 A. Para que a tensão do secundário não se eleve excessivamente quando a lâmpada alimentada se funde, como aconteceria num vulgar transformador de corrente, o transformador de isolamento deve trabalhar com o núcleo próximo da saturação. Existem dois tipos construtivos, próprios para serem enterrados: montagem dentro de uma caixa de ferro fundido e montagem isolada a neopreno injectado sob pressão; em ambos os tipos saem duas pontas de cabo iguais, isoladas a neopreno, para ligação ao cabo unipolar do circuito série, uma ponta com ficha-macho e outra com ficha-fêmea; além disso prevê-se uma terceira ponta de cabo, bipolar e com ficha-fêmea, também isolada a neopreno, que se destina à ligação da lâmpada.

As *junções* necessárias nos cabos fazem-se no local da montagem por vulcanização da borracha isolante. As fichas das junções, que nos cabos a neopreno possibilitam uma instalação rápida e fácil, devem ser perfeitamente estanques, de maneira a assegurar uma resistência de isolamento estanque, de forma a assegurarem uma resistência de isolamento bastante elevada (da ordem de 3000 MΩ). A ligação de uma ficha-macho a uma ficha-fêmea na constituição de uma junção pode ser feita simplesmente por fita plástica adesiva sobre a união, e deve garantir uma resistência de isolamento em relação à terra da ordem da dezena de mega-ohms. Se o cabo de ligação for de outro tipo, o que não se costuma usar, as ligações devem evidentemente ser adaptadas a esse cabo. As fichas são previstas para uma tensão de isolamento de 5000 V, e as

junções devem possuir as seguintes propriedades: queda de tensão de contacto inferior a 7,5 mV sob 25 A; após a imersão em água durante 24 horas cada ligação deve suportar uma tensão contínua de 15 kV durante dois minutos; a resistência de isolamento deve ser superior a 3000 MΩ sob a tensão contínua de 10 kV.

Uma *protecção com pára-raios* é ainda indispensável à saída da fonte de alimentação, pois estando os circuitos série disseminados por dezenas de quilómetros é altamente provável, e na realidade assim se constata, que descargas atmosféricas provoquem tensões choque que se propagam nos cabos rapidamente, com prejuízos danificadores na respectiva fonte se não forem tomadas as convenientes providências.

Ainda se prevêem outras características na instalação completa, que não importa agora acentuar, como sinalizações de circuitos ligados ou desligados. Apenas se observa que, para uma supervisão do número de lâmpadas avariadas nos circuitos série, convém intercalar um monitor sensível à respectiva impedância e que assinale determinado limiar afim de alertar à vistoria do estado de funcionamento das lâmpadas.

6. CONCLUSÕES

As redes de corrente constante não são muito comuns aos engenheiros electrotécnicos e por isso merecem apenas uma leve referência nos cursos de electrotecnia e até na literatura. Mas a sua enorme importância na segurança dos aeroportos justifica um conhecimento profundo do modo de solucionar os seus problemas. Neste objectivo foram analisadas as suas características específicas e detalharam-se os elementos constituintes, tais como, fonte de alimentação, cabos de energia, protecções e ligações entre os órgãos.

Sob o ponto de vista estritamente pedagógico, visto que à nossa indústria escapa a função tecnológica na respectiva construção, merece ainda especial estudo o detalhe de cada um dos tipos de fonte de alimentação, pois se apresentaram tão somente os pensamentos basilares. Mas a entrada na descrição pormenorizada dos funcionamentos e as análises científicas são do interesse do especialista. Por isso se evitaram. Poder-se-ão no entanto expôr, se melhores razões houver ■