

Princípios tecnológicos dos cabos de alta tensão

HERMÍNIO DUARTE-RAMOS

Dr. Engenheiro Electrotécnico

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento científico das concepções prosseguidas pela tecnologia dos cabos eléctricos isolados, de superior importância no progresso de qualquer sociedade moderna por se encontrar nas aplicações da engenharia electrotécnica especialmente no domínio da energética, acerca-se ao desenvolvimento dos seus constituintes essenciais: materiais condutores e materiais isolantes.

Quanto aos condutores, o cobre tem exibido melhor significado económico juntamente com as suas boas propriedades eléctricas, mas nos tempos recentes o alumínio manifestou-se em muitos casos competitivo, tentando-se nos últimos tempos a utilização de materiais de natureza muito diferente, ainda sem expressão industrial: sódio, supercondutores e materiais sintéticos.

No que respeita aos isolantes têm-se praticado diversos aproveitamentos, desde a borracha natural aos polímeros artificiais, passando pelo papel impregnado e dieléctricos fluidos, quer óleos quer gases. O problema do isolamento eléctrico encorpa sem dúvida o cerne mais premente da electrotecnia industrial.

Para se concluir da melhor aplicabilidade dos cabos nos mais distintos processos industriais convém assimilar os princípios justificativos de cada tipo de cabo eléctrico. Ora entende-se que a apreensão desses valorosos conhecimentos é natural e simples através

da análise da evolução histórica do respectivo desenvolvimento, pois assim com a criatividade humana se justificam as soluções tecnológicas hoje praticadas ao mesmo tempo que se discutem as suas vantagens e os inconvenientes em relação a outras técnicas anteriormente preconizadas. Dentro destes pensamentos se delinearam os objectivos do presente trabalho.

2. EVOLUÇÃO INICIAL DA TECNOLOGIA DOS CABOS ELÉCTRICOS

Em meados do século passado surgiram as primeiras aplicações da energia eléctrica nas lâmpadas de arco e nas comunicações por telegrafia. Em 1850 um *cabo a gutapercha*, cujos fios de cobre eram envolvidos por este isolante natural, ligava a Inglaterra à França protegido num tubo de ferro.

Depressa se reconheceu a importância da iluminação por lâmpadas de arco voltaico, já apresentadas em Lisboa no ano de 1878. Berlim em 1880 foi iluminada pela primeira vez com energia eléctrica por Werner von Siemens utilizando *cabos a gutapercha e juta asfáltica*, com a secção em cobre de 4 mm², para serviço à tensão contínua de 220 V e até 7 A na intensidade de corrente.

Inventaram-se entretanto as lâmpadas de incandescência, que ampliaram grandemente o interesse da energia eléctrica na sociedade, levando por consequência a um maior desenvolvimento dos cabos eléctricos a fim de se realizarem as respectivas alimentações. Nessa época o progresso deu-se na Inglaterra e nos Estados Unidos da América pelos *cabos a borracha natural*, enquanto na Alemanha se fazia o aproveitamento de materiais fibrosos como juta e cânhamo.

A construção de cabos isolados a gutapercha e fibras envolventes exigia uma massa de impregnação, sendo usada principalmente vaselina, e a adição de uma resina natural com vista à obtenção da consistência indispensável ao conveniente funcionamento. Para evitar a infiltração de humidade pensou M. Borel em 1880 aplicar um manto de chumbo, através de uma prensa de injeção semelhante à usada na aplicação da gutapercha, tendo entrado em serviço pela primeira vez em 1882 um *cabo com bainha de chumbo* para a tensão contínua de 650 V na iluminação das ruas de Berlim. Também assim Lisboa viu em 1889 a Avenida da Liberdade iluminada por meio da energia eléctrica.

As potências sucessivamente crescentes obrigaram entretanto a aumentar a secção dos cabos, até que se atingiu o limite superior, sob o ponto de vista económico, da ordem de 1000 mm². As exigências dos elevados consumos só poderiam ser satisfeitas pela subida da tensão de serviço. E daí a preferência atribuída aos transformadores em vez de acumuladores, isto é, a supremacia da corrente alternada monofásica sobre a corrente contínua. Em 1884 um cabo de alta tensão, para 7,5 kV, *cabo isolado a borracha e unipolar* (portanto com um só condutor), efectuava parte da distribuição na iluminação de Berlim. A produção de cabos de alta tensão despertara o interesse da indústria electromecânica.

Em Depthford na Inglaterra no ano de 1890 foi instalada uma central de produção monofásica a 10 kV, tendo Ferranti para isso desenvolvido o primeiro *cabo a papel impregnado* isolado para alta tensão. Ensaio que efectuou num cabo isolado a juta e com bainha de chumbo condenaram este tipo de construção levando a novo processo tecnológico: considerou como condutor uma fita de cobre com a espessura de 3 mm em forma de tubo oco e enrolou várias camadas de fita de papel impregnado em alcatrão, protegendo mecanicamente a instalação por enfiamento num tubo de ferro. O desenvolvimento dos cabos isolados a papel impregnado haveria de sofrer posteriormente um grande impulso.

Entretanto as redes trifásicas de distribuição destronavam em definitivo os circuitos de corrente contínua, pois reduziam grandemente as perdas e permitiam transportar muito maiores quantidades de energia à distância para uma determinada secção dos condutores e num dado intervalo de tempo. É notável a experiência que Oskar von Miller, em 1891, realizou na transmissão de 75 kW a uma distância de 175 km entre Lauffen e Frankfurt. O tipo de fabrico de cabos para redes trifásicas mantinha-se porém análogo ao dos cabos para corrente contínua, quer dizer, concebiam-se *cabos unipolares para redes trifásicas*.

Embora o cabo unipolar tivesse um bom funcionamento no transporte em corrente contínua, apresentava alguns inconvenientes na corrente alternada, nomeadamente no que respeita à queda de tensão adicional devida à indutância e ao aumento considerável de perdas por correntes parasitas na armadura de aço necessária à protecção mecânica. Por isso já em 1898 se fabricavam *cabos trifásicos* constituídos por três condutores isolados entre si e cableados simetricamente em torno do eixo comum, em resumo, cabos tripolares.

3. CABOS COM ISOLANTES FLUIDOS

Começou então o grande desenvolvimento da indústria de cabos eléctricos, a acompanhar o crescente consumo de energia eléctrica nos processos industriais, pelo caminho das tensões sucessivamente mais altas.

Ora as perdas dieléctricas dos materiais isolantes, devidas a fenómenos de polarização e de condução (sem referir as perdas de ionização), crescem com o quadrado da tensão U , pois essa potência activa é expressa pela relação $p = 2\pi fCU^2 \operatorname{tg}\delta$, onde f representa a frequência e C a capacidade eléctrica que por seu lado é proporcional à permitividade ϵ . Nestas condições os cientistas e tecnólogos tiveram apenas um pensamento na redução desse prejuízo: encontrar materiais isolantes com diminuto índice de perdas $\epsilon \operatorname{tg}\delta$ e adaptáveis às técnicas de fabrico dos cabos eléctricos. O rumo ficou por conseguinte traçado. Haveria de caber à tecnologia de fabricação de materiais isolantes essa participação decisiva no progresso, primeiro através do papel impregnado em óleo e mais tarde na preparação artificial de materiais poliméricos.

Mas no alvorecer do século XX foi detectado, acima de uma certa tensão crítica, o aparecimento do fenómeno de ionização, que eleva muitíssimo o factor de dissipação $\operatorname{tg}\delta$ e, por consequência, as respectivas perdas de energia. Entendia-se que a sua causa residia na distribuição irregular do campo eléctrico entre os três condutores de um cabo trifásico de alta tensão, intensificando-se excessivamente o campo eléctrico nalgumas regiões e daí o estabelecimento de descargas parciais nas cavidades existentes entre as camadas de papel impregnado.

Foi o alemão Hoechstaedter que em 1913 teve a ideia de envolver o isolante individual de cada um dos três condutores do cabo tripolar por meio de uma fita metálica ou papel metalizado, cobertura que constituindo uma superfície equipotencial concêntrica com o condutor uniformiza o campo eléctrico à sua volta. Por força da guerra mundial imediata o primeiro *cabo metalizado* (também dito *cabo H*, em homenagem ao inventor do princípio tecnológico) foi fabricado somente após o conflito, na fábrica francesa Jeumont, tendo o progresso tecnológico sido imediatamente seguido por outros fabricantes sobretudo em cabos acima de 10 kV [1].

Nas redes de tensão composta nominal até 30 kV (muito excepcionalmente 60 kV) dominaram os *cabos a papel com massa* de impregnação. O papel isolante exhibe porém um coeficiente de dilatação térmica diferente do verificado no meio de impregnação e na cobertura de chumbo, pelo que após algum tempo de serviço se formam cavidades internas em consequência de sucessivos aquecimentos e arrefecimentos impostos pelo respectivo diagrama de carga. Sendo estas cavidades preenchidas com gases, normalmente o ar, cuja permitividade é inferior à do restante isolante, a repartição de potenciais subordina esses defeitos a esforços eléctricos mais pronunciados com a consequente formação de descargas parciais. Estes fenómenos de ionização além de aumentarem as perdas dieléctricas podem ainda ter por efeito a deterioração progressiva da espessura isolante pelo fenómeno de arvorejamento, seguindo-se uma redução apreciável na duração de vida do cabo.

Convém observar que estes agravamentos surgem das próprias condições de serviço de cada cabo, mesmo admitindo um fabrico perfeito, ou seja, até mesmo na hipótese de não haver formação de bolhas gasosas no seio isolante durante as operações de fabrico (portanto em adequadas instalações de vácuo na secagem e na impregnação). Daí a conclusão fundamental das tensões elevadas, acima de 30 kV, exigirem tecnologia diferente no fabrico de cabos eléctricos: o problema consiste em evitar a formação de cavidades. Conseguiu-se primeiramente esse objectivo nos cabos isolados a óleo e em cabos isolados a gás.

O princípio científico dos *cabos a óleo* foi proposto em 1878 pelo americano David Brooks, mas a sua realização tecnológica deve-se ao engenheiro italiano Luigi Emanuelli no ano de 1917: em vez da impregnação ser feita por massa usa-se um óleo isolante pouco viscoso dentro de canais em torno dos fios condutores de cada fase, havendo nas extremidades do cabo reservatórios para expansão do óleo quando se dá o aquecimento do cabo em serviço, e fornecimento automático de óleo ao cabo logo que ocorre o seu arrefecimento, por acção de membranas contidas nos depósitos sob ar comprimido.

O primeiro *cabo a óleo de baixa pressão* foi construído na Itália pela Pirelli em 1923, para a tensão de 132 kV, sendo unipolar com o condutor oco preenchido por óleo de transformador sob a pressão de três atmosferas, e que entrou em serviço no ano seguinte, em Mailand. Três anos mais tarde instalaram-se cerca de 30 km deste tipo de cabo a 138 kV entre New York e Chicago [2]. Uma instalação de 220 kV realizada com o mesmo tipo de cabo entrou em serviço em 1936 na cidade de Paris. Também o primeiro cabo a 400 kV foi construído em França. No ano de 1964 começou a ser utilizado um destes cabos a 500 kV na central hidroeléctrica de Volgograda na União Soviética.

É evidente que um *cabo a óleo de alta pressão* terá uma rigidez dieléctrica crescente com a pressão do meio fluido isolante. Em 1931 o americano C. E. Bennet colocou em serviço o primeiro cabo tripolar num tubo de aço cheio de óleo no estado líquido sob a pressão de 15 atmosferas. Nos EUA este tipo de fabricação, designado «oilostatic cable», foi alvo de larga divulgação, tendo sido já utilizado até 345 kV [3].

A justificação tecnológica dos *cabos a gás* é ditada pela lei de Paschen, estabelecida experimentalmente em 1889 e confirmada pela teoria das avalanches de Townsend (as quais se desencadeiam por efeito de colisão electrónica com os átomos do gás isolante) e elaborada completamente em 1926 por Rogowski através do efeito de emissão secundária na colisão dos iões positivos com o metal catódico. Determina essa lei que a tensão de ruptura do gás é apenas função do produto da sua pressão pela espessura isolante gasosa. Deste modo se compreende que o aumento da pressão do gás permita reduzir de igual factor a distância disruptiva para que a tensão de ruptura se mantenha.

Uma patente dos engenheiros americanos A. W. Fisher e R. W. Atkinson no ano de 1920 propunha um dieléctrico de papel fracamente impregnado (ou mesmo sem impregnação) e no seio de um gás comprimido que elevava a rigidez dieléctrica. A realização deste pensamento verificou-se dez anos mais tarde, e só após cinco anos de investigação entrou em serviço o primeiro *cabo a gás interno* sob pressão, isto é, em

1937 por C. I. Beaver e E. L. Davey com o chamado com os condutores.

Conceberam-se diversas variantes deste tipo de cabo, sobretudo na Inglaterra, cada uma com as suas propriedades peculiares. Por exemplo, os inconvenientes provenientes do contacto directo do gás sob pressão com o meio de impregnação foram eliminados a partir do conhecimento da diferença entre os comportamentos eléctricos do ar e de um gás inerte (como o azoto). Hoje aplicam-se estes *cabos a gás interno e impregnados* até 220 kV.

Outra variante de cabos a gás interior foi realizada em 1937 por C. I. Beaver e E. L. Davey com o chamado «pre-impregnated gas-filled cable» no qual o papel isolante é previamente impregnado, formando-se o dieléctrico com camadas desse papel, e onde as cavidades entre estas camadas ou os condutores cableados se preenchem com gás sob a pressão de 15 atmosferas. Já se usaram estes *cabos a gás interno e pré-impregnados* até tensões de 132 kV.

Uma patente de Hoechstaedter registada no ano de 1926 sugeriu o fabrico de cabos em que o meio sob pressão (óleo ou gás) se encontra separado do dieléctrico. A construção de um *cabo a gás externo* realizou-se pela primeira vez na Inglaterra em 1931, para a tensão de 66 kV, com os três condutores das fases isolados a papel impregnado em massa dentro de um tubo de aço cheio de azoto sob 15 atmosferas: ao dar-se o aquecimento do cabo a bainha de chumbo cede as forças de dilatação do meio de impregnação ao gás comprimido, e quando arrefecer o cabo a acção deste gás volta a juntar a impregnação à bainha, evitando-se nestas circunstâncias a formação de cavidades. Este tipo de cabo, que tem sido usado numa gama de tensões entre 50 e 275 kV, é particularmente importante nos casos em que haja grandes diferenças de altura, pois nestas condições, devido à alta pressão estática resultante, seria incomportável instalar um cabo a óleo.

4. CABOS COM ISOLANTES SECOS

Para tensões relativamente moderadas, nas redes de distribuição, tal como na baixa tensão, onde as necessidades em cabos são preponderantes, foi sempre preocupação dos fabricantes reduzir o custo de produção. Por isso se preferiu a construção de cabos a papel com bainha de chumbo. Mas ao começar a década em 1930, na Europa e nos EUA, aconteceram as primeiras tentativas de utilização dos materiais poliméricos no isolamento e no revestimento de cabos eléctricos, que haveriam de revelar grande simplificação no processo de fabrico.

Por outro lado os cabos de papel impregnado em massa, evitados da possibilidade de derramamento nos seus terminais, exigiam caixas estanques, caras e de montagem muito especializada, além do chumbo tornar o produto pesado, pouco flexível e com perigo de corrosão intercrystalina. Os chamados *cabos secos* (fig. 1) ainda poderiam ser montados em declives elevados sem perigo de diminuição das propriedades de isolamento por derramamentos do meio isolante. E assim se começaram a fabricar cabos isolados a borracha artificial (já no século passado se usou a borracha natural nas tensões baixas, como se referiu), depois com o policloreto de vinilo e mais recentemente o polietileno.

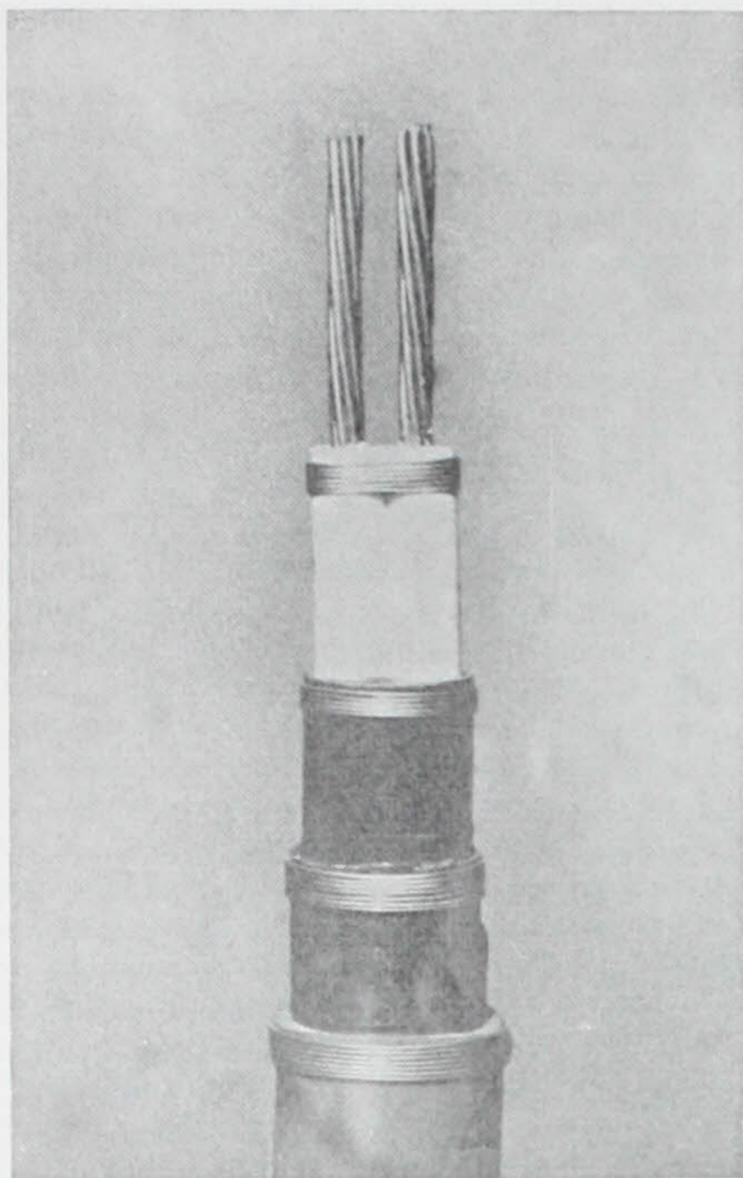


Fig. 1 — Cabo armado bipolar isolado a PVC (fabrico CONDEL, em Luanda)

Em 1935 deu-se início ao fabrico de *cabos a neopreno*, hoje aplicados nos circuitos série de iluminação das pistas de aeroportos, até tensões de 5 kV, porque o isolante elastómero lhes confere boa resistência à humidade e segurança na exploração. Durante a segunda guerra mundial foram aproveitadas outras borrachas artificiais, por exemplo a borracha butil, tendo os correspondentes cabos tido grande aplicação nos EUA sobretudo na iluminação urbana.

O policloreto de vinilo, conhecido internacionalmente pela sigla PVC, foi descoberto a meados do século passado, mas só se aplicou na indústria de cabos eléctricos no início da década de 1930 a 1940, desenvolvendo-se muito durante a segunda guerra mundial. As suas propriedades revelaram-se satisfatórias por permitirem uma fácil tecnologia de fabrico, inclusivamente em cores variadas de identificação, além das propriedades eléctricas (em especial a rigidez dieléctrica) e propriedades dieléctricas (índice de perdas) serem aceitáveis até tensões de 15 kV. Os *cabos a PVC* (fig. 2) resultam relativamente baratos, e são aplicáveis, segundo as recomendações internacionais, até 10 kV, podendo excepcionalmente admitir-se a 20 kV (mas aí as perdas tornam-se excessivamente elevadas e portanto a duração de vida da instalação respectiva é grandemente reduzida por envelhecimento térmico). São ainda vantagens a sua elasticidade e suficiente robustez mecânica, boa resistência a ataques químicos, à chama e ao ozono, amaciando no entanto acima de 70°C.

Em 1933 a ICI na Inglaterra inventou a fabricação do polietileno, material referenciado na tecnologia pela

abreviatura PE, que possui extraordinárias propriedades dieléctricas mesmo nas altas frequências. O seu aproveitamento no isolamento de cabos começou a ser feito nos EUA durante a última grande guerra nas comunicações em cabos submarinos, pois o polietileno não absorve água, tendo-se rapidamente generalizado o seu uso no domínio das altas frequências. Mas depois do final da guerra mundial também se começou a aplicar no fabrico de cabos de energia, em especial pela sua elevada rigidez dieléctrica, ínfimo factor de perdas e reduzida permitividade. As primeiras instalações de alta tensão com *cabos a PE* não foram muito felizes por que a duração de vida deste polímero é muitíssimo enfraquecida pela ionização, quer por descargas superficiais que dão lugar à erosão e ao rastejamento (fenómeno conhecido em inglês por «tracking»), quer por descargas parciais em cavidades internas que originam o arvorejamento (ou «treeing»). De facto na tecnologia de fabrico aparecem grandes dificuldades provenientes do elevado coeficiente de dilatação térmica do polietileno, que facilita a formação dessas cavidades. Além disso este material não resiste ao ozono, pelo que é facilmente atacável pelos fenómenos de arvorejamento e de rastejamento.

A investigação insiste na utilização do polietileno nas muito altas tensões criando ligações químicas entre as cadeias macromoleculares, em processos semelhantes à vulcanização, resultando um polímero emalhado e portanto de maior solidez [4]. Já existem instalações em serviço com *cabos a polietileno reticulado* até 145 kV e nalguns casos experimentais a 245 kV.

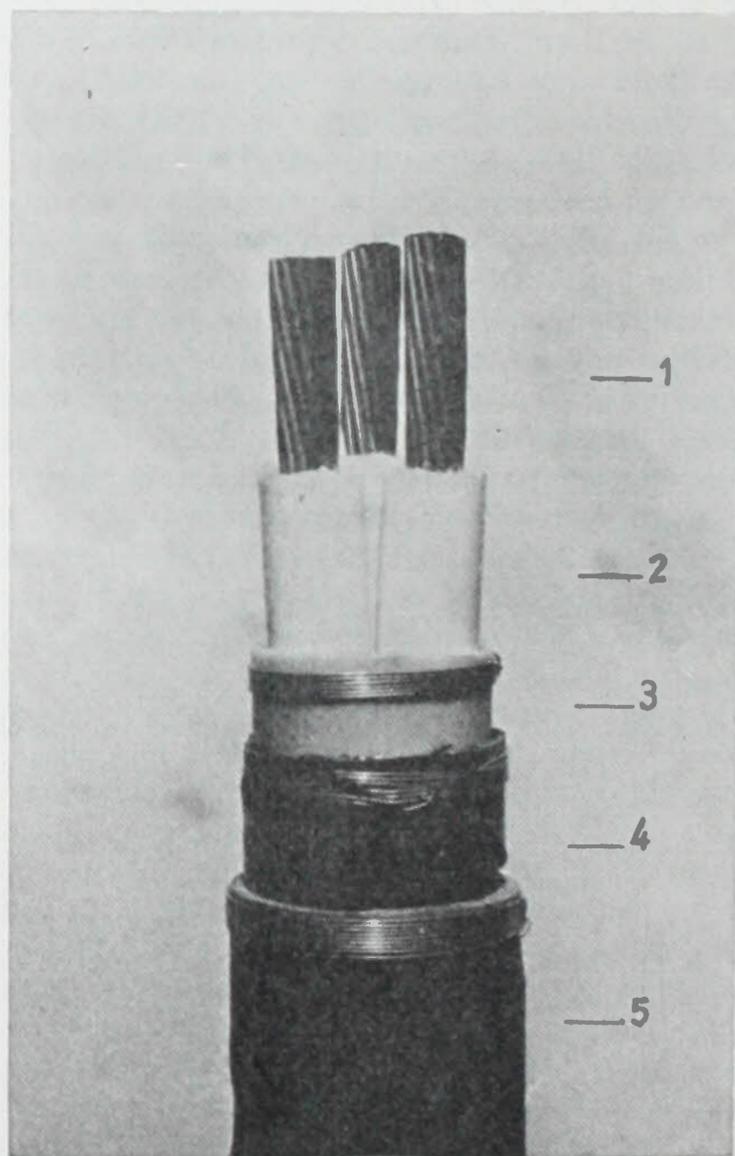


Fig. 2 — Cabo armado tripolar, tipo NYBY (ou, segundo a nova nomenclatura, VAV), secção $3 \times 50 \text{ mm}^2$, tensão 6 kV: 1 — condutor em cobre multifilar; 2 — isolante do condutor em PVC; 3 — isolante do cabo em PVC; 4 — armadura de protecção em aço; 5 — revestimento do cabo em PVC (fabrico CONDEL, em Luanda)

VENTILADORES DE TECTO

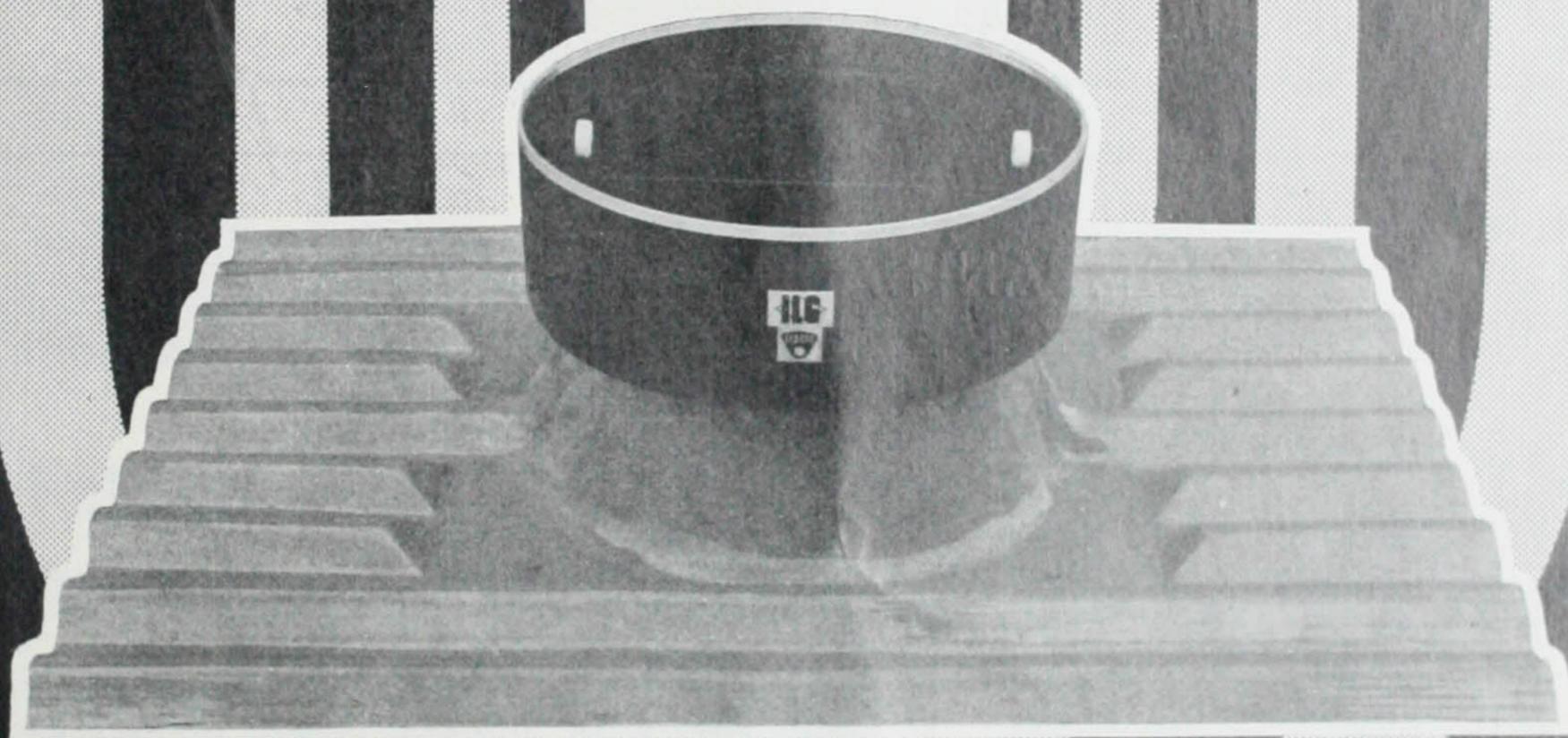


Série TH

- Inteiramente fabricados em poliéster reforçado "fibra de vidro"
- Instalação imediata sem necessidade de qualquer trabalho de construção civil
- Funcionamento silencioso ● Persianas de fecho automático

EFACEC

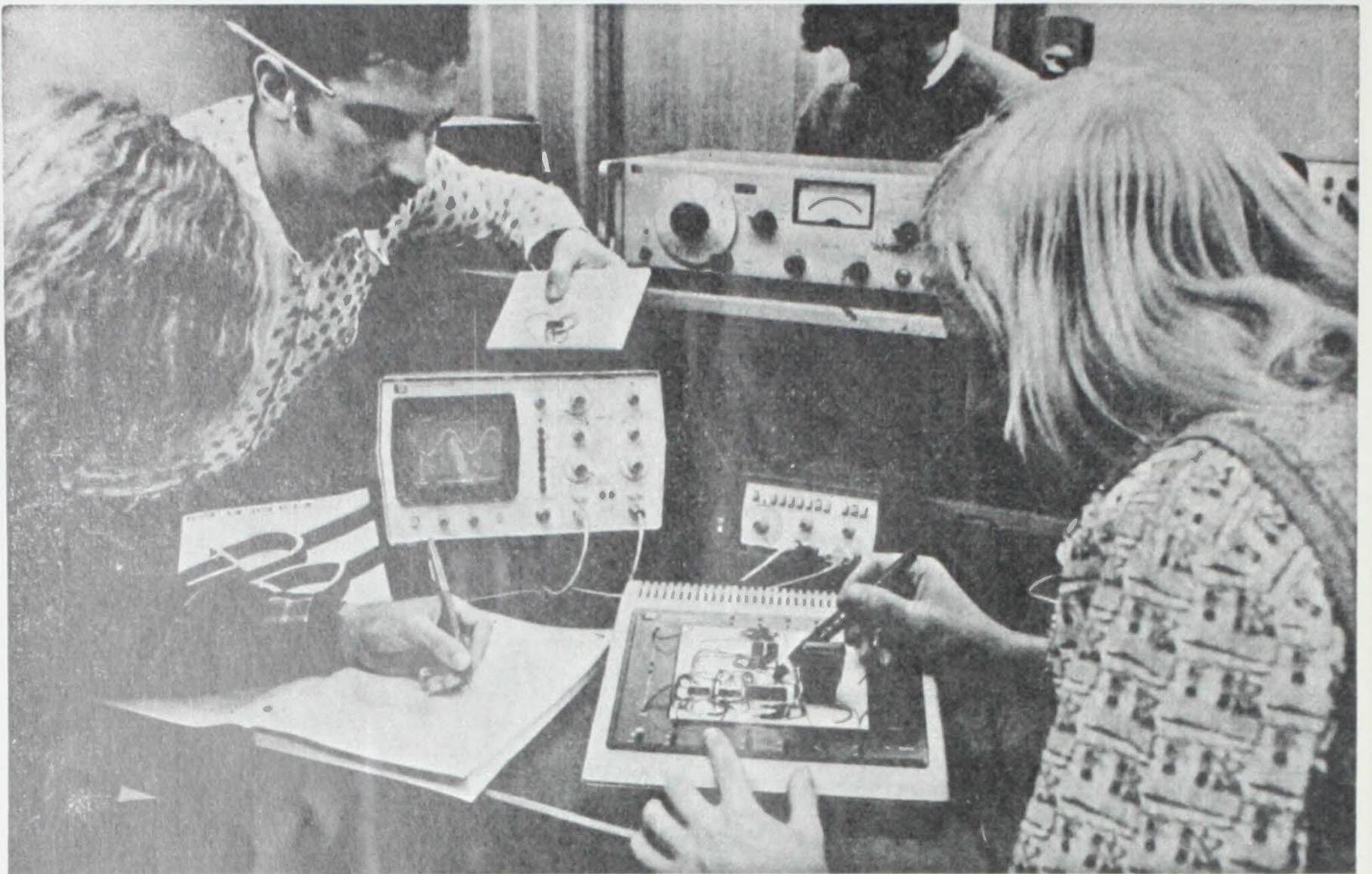
**AR
renovado**



**INSTALAÇÕES DE VENTILAÇÃO INDUSTRIAL
E TRANSPORTE PNEUMÁTICO**

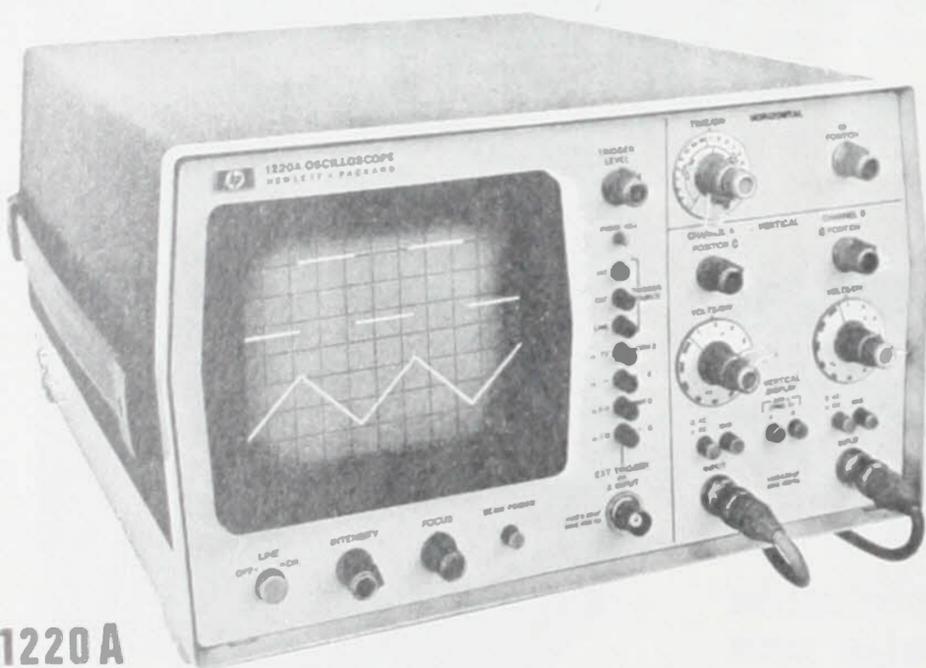
EFACEC

SERVIÇOS COMERCIAIS: LISBOA · Rua Rodrigo da Fonseca, 76-3.º
PORTO · Rua Sá da Bandeira, 706-5.º

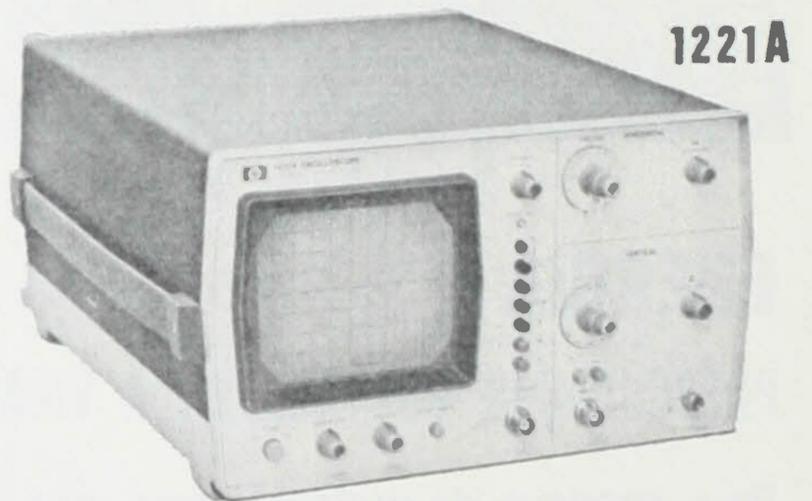


OSCIOSCÓPIOS CONCEBIDOS ESPECIALMENTE PARA O ENSINO TÉCNICO

HEWLETT  PACKARD



1220 A



1221A

1220 A	1221A
2 CANAIS	1 CANAL
DC A 15 MHZ	
SENSIBILIDADE 2mV/DIVISÃO	

PEÇA INDICAÇÕES COMPLETAS A



TELECTRA

EMPRESA TÉCNICA DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS, S.A.R.L.

R. Rodrigo da Fonseca, 103 · LISBOA

Telefones 68 60 72 · 3 · 4 · 5 · Telex 1598

R. José Falcão, 15 · 4º Dto. PORTO · Tel. 2 62 09 · 3 33 50

5. PERSPECTIVAS DA FUTURA TECNOLOGIA DE CABOS ELÉTRICOS

Razões económicas e considerações sobre as reservas de matérias-primas, em conjunto com as consequências inerentes ao vertiginoso crescimento das potências em jogo, levaram à busca de novos materiais isolantes, sobretudo entre os gases electronegativos, e a tactear novas soluções para a condução eléctrica. Neste último aspecto a investigação científica indica três linhas de rumo na resolução das exigências, cada vez mais agrestes, previstas para o futuro, todas preocupadas com a natureza dos mecanismos de condução da corrente eléctrica: cabos de sódio metálico, a baixas temperaturas e por supercondutividade.

Na derradeira dezena de anos verificou-se nos países altamente industrializados, como por exemplo no Japão, um tremendo incremento nos consumos de energia eléctrica, provocando de seguida a procura de soluções baseadas na máxima potência de transmissão. A exemplo do que se passava nos EUA e na Inglaterra os investigadores na generalidade debruçaram-se desde 1965 sobre o aproveitamento de gases electronegativos comprimidos no isolamento eléctrico, sobretudo o hexafluoreto de enxofre pela sua elevada rigidez dieléctrica (cerca de três vezes a do ar), perdas insignificantes e bom efeito arrefecedor. A pesquisa tecnológica porém ainda não satisfaz convenientemente os anseios, pois sendo necessários espaçadores de suporte dos condutores provocam-se distorções na distribuição do campo eléctrico que afectam muito a rigidez dieléctrica do gás [5]. No domínio da investigação têm-se ensaiado *cabos a hexafluoreto de enxofre* para sistemas até 500 kV, com a corrente nominal de 2500 A e a potência nominal de 2200 MVA. Existem dois tipos destes cabos: um tipo rígido, quer no condutor quer no tubo que serve também de blindagem; e outro tipo flexível, o qual se pode enrolar em bobinas. No primeiro caso o condutor tem maior secção e portanto possibilita maior potência de transmissão, exibindo ainda a vantagem da intensidade do campo eléctrico à superfície do condutor resultar mais suave. O segundo caso mostra superiores vantagens na facilidade de fabrico, transporte e montagem, devido à sua flexibilidade, além de que se permitem construir comprimentos contínuos de maior extensão, evitando-se caixas de união que complicam sempre a instalação e aumentam o perigo de infiltração de impurezas no gás isolante; mas em contrapartida o enrolamento do cabo flexível numa bobina limita o seu diâmetro e provoca enrugamentos que deterioram as suas características.

O metal sódio foi descoberto em 1807 na Inglaterra por Humphrey Davy. Em 1901 Sinclair registou uma patente na Suíça onde usava o sódio como condutor eléctrico, tendo reconhecido vantagens económicas na sua aplicação relativamente ao cobre e ao alumínio, ao mesmo tempo que indicava a necessidade de envolver o condutor de sódio por um invólucro impermeável ao ar e à humidade (podendo este revestimento ser condutor, por exemplo cobre ou alumínio, ou isolante, como borracha, mica ou vidro). Desde então surgiram várias tentativas de realizar esta ideia, com Betts em 1905 na França e no ano seguinte nos EUA, Dow em 1927, Cantacuzene em 1952 de novo na França e Koning na Holanda em 1955. No ano de 1966 uma

fábrica de Chicago começou a fazer larga aplicação dos *cabos de sódio* na rede de distribuição a 15 kV da cidade [6], devido às seguintes vantagens essenciais: os condutores de sódio resistem a maiores correntes de curto-circuito de qualquer duração do que os condutores de cobre ou de alumínio, em consequência do efeito de fusão do sódio que evita a subida perigosa da temperatura; os condutores de sódio isolados a polietileno são bastante mais fáceis de fabricar, pois o processo tecnológico é muito simplificado por se eliminar a necessidade de cableagem, e podem ser enfiados em canalizações com maior facilidade, além do condutor e do isolante possuírem igual coeficiente de dilatação térmica; os cabos de sódio são extraordinariamente flexíveis, muito mais baratos e a matéria-prima é abundante em todas as regiões da terra e praticamente inesgotável. A dificuldade desta tecnologia reside nos acessórios de ligação.

A partir da década passada a tecnologia das baixas temperaturas, designada genericamente por criogenia, tem experimentado vastos progressos conduzindo ao desenvolvimento dos cabos de condutores normais (em cobre ou em alumínio) a baixas temperaturas e aos cabos com supercondutores.

Especialmente nos EUA, Inglaterra e Alemanha a investigação industrial tem procurado fabricar *cabos criogénicos* trifásicos, de cobre ou de alumínio, a baixas temperaturas, para tensões até 500 kV e potências da ordem de 5 GVA, usando como meios refrigeradores o azoto líquido ou o hidrogénio líquido. O problema é particularmente interessante nas potências muito elevadas. De facto prevêem-se para o final do presente século circuitos eléctricos de 50 GW nos quais se preferem os cabos criogénicos arrefecidos a hidrogénio, por se rezear que as reservas de hélio (com que funcionam os cabos supercondutores) não sejam bastantes para as linhas de supercondução, além de que o hidrogénio se obtém a preço inferior ao do hélio. Apesar disso as perdas dieléctricas dos líquidos criogénicos são muito escassas e a rigidez dieléctrica é superior à dos óleos. Tais razões justificaram o estudo do papel impregnado e outros isolantes poliméricos com o hidrogénio líquido [8] tendo-se conseguido óptimas propriedades dieléctricas: menores perdas do que na impregnação a óleo; superiores tensões de início do crescimento do factor de dissipação; a humidade no papel melhora as propriedades do hidrogénio líquido, em vez de provocar a degradação como sucede no óleo; o hidrogénio líquido não carboniza por acção de descargas parciais.

Na transmissão de corrente contínua por intermédio de *cabos supercondutores* utiliza-se o chamado supercondutor duro, por exemplo Nb_3Sn , mas no transporte de corrente trifásica em supercondução a distâncias de várias centenas de quilómetros e potências da ordem de 1 GVA é preferível um supercondutor macio como chumbo ou nióbio. Neste tipo de construção o supercondutor isolado encontra-se inserido num tubo com hélio líquido à temperatura aproximada de 4°K sendo o tubo termicamente isolado através do vácuo e arrefecido a 77°K por meio de azoto líquido [9]. A utilização dos supercondutores permite pensar na ligação directa das redes de distribuição aos geradores, dispensando os transformadores de potência elevadores da tensão, além de eliminar a limitação na distância em redes de distribuição urbana convencio-

nais. Graças ao seu elevado rendimento este tipo de cabo promete o melhor aproveitamento nos territórios com grande extensão geográfica. Mas a pesquisa tecnológica esforça-se ainda por alcançar resultados de melhor aceitação.

6. CONCLUSÕES

Em linhas gerais o desenvolvimento dos cabos eléctricos seguiu os trâmites da electrotecnia e em particular no que respeita à ciência dos materiais isolantes: a princípio as preocupações residiam na corrente contínua, em cabos unipolares isolados por materiais de origem natural; depois passou-se para a corrente alternada já de alta tensão, desde os cabos a papel impregnado a óleo e armados, cabos metalizados, cabos a papel em massa de impregnação, cabos a óleo de baixa ou de alta pressão, cabos a gás interno, a gás interno e impregnados, a gás interno e pré-impregnados, cabos a gás externo; entretanto surgiram os cabos secos, isolados a borracha, a neopreno, a policloreto de vinilo, a polietileno, até ao polietileno reticulado; finalmente tentou-se melhor solução no isolamento com gases electronegativos, entre os quais o hexafluoreto de enxofre.

Relativamente aos materiais condutores também o progresso da electrotecnia teórica tem subordinado as escaladas do desenvolvimento tecnológico, em especial para dar resposta às exigências sucessivamente agrestes das enormes potências: primeiro aplicou-se o cobre e mais tarde o alumínio; actualmente aproveitam-se os supercondutores e o sódio; procuram-se no entanto possibilidades gigantescas nas baixas temperaturas através da criogenia.

Em todo o imenso quadro de conhecimentos inerentes ao fabrico e às aplicações de cabos eléctricos não é possível distinguir as contribuições individualizadas da ciência e da tecnologia, tão estreitamente se interfluenciaram na sua germinação. Na verdade a

simbiose da teorização dos conceitos com a pesquisa experimental caracteriza intimamente o pensamento científico moderno, sobretudo na sua intersecção com a sociedade. Neste parecer a tecnologia dos cabos eléctricos constitui um exemplo dos mais significativos.

AGRADECIMENTOS

Para o estudo efectuado contribuiu o estímulo concedido pelo administrador Pereira Alves da Fábrica de cabos CONDEL, em Luanda (filial da CEL-CAT, de Lisboa), e do seu director técnico Eng. Serra Alegria a quem se presta agradecimento pela compreensão revelada na interpenetração do trabalho do investigador e do fabricante ■

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Hoehstaedter: *Der Ionisierungspunkt von Hochspannungskabeln*; ETZ 43 (1922) p. 575-580, 612-616, 641-645.
- [2] L. Emanuelli: *Le line in cavo a 132 000 volt a New York e Chicago*; L'Elettrotecnica 15 (1928).
- [3] C. E. Bennet, R. J. Wiseman: *Le Cable Oilostatic*; CIGRE (1948) n.º 218.
- [4] A. L. Mckean, F. S. Olivier, S. W. Trill: *Cross-Linked Polythylene for Higher Voltages*; IEEE Trans., PAS-86 (1967) p. 1-8.
- [5] S. Fukuda: *Current-Carrying and Short-Circuit Tests on EHV Cables Insulated with SF₆ Gas*; IEEE Trans., PAS-88 (1969) p. 147-153.
- [6] L. E. Humphrey, R. C. Hess, G. I. Addis: *Insulated Sodium Conductors*; IEEE Trans., PAS-86 (1967) p. 876-883.
- [7] H. Sequenz: *Entwicklung der Erzeugung und Verteilung elektrischer Energie bis zur Jahrtausendwende*; Elektrotechnik und Maschinenbau, 88 (1971) p. 245-255.
- [8] M. J. Jefferies, K. N. Mathes: *Insulation Systems for Cryogenic Cable*; IEEE Trans., PAS-89 (1970) p. 2006-2014.
- [9] P. Klauudy: *Ueber tiefgekuehlte, besonders supraleitende Kabel*; Elektrotechnik und Maschinenbau, 89 (1972) p. 93-110.