UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RODRIGO BORGES BIANSINI

ENSAIOS EM CONECTORES DO TIPO PERFURANTE

PORTO ALEGRE
2014

RODRIGO BORGES BIANSINI

ENSAIOS EM CONECTORES DO TIPO PERFURANTE

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos

PORTO ALEGRE
2014

RODRIGO BORGES BIANSINI

ENSAIOS EM CONECTORES DO TIPO PERFURANTE

Este projeto de diplomação foi analisado e julgado adequado para a obtenção de título de bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: _____
Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos

Coordenador:_____
Prof. Dr. Altamiro Amadeu Susin

Aprovado em : __/__/____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos _____

Prof. Dr. Valner João Brusamarello _____

Eng. Gutter Da Rodda _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade de estar se formando neste curso e por ter me abençoado grandemente durante estes anos de graduação e me capacitado para tal além de colocar pessoas no meu caminho que tornaram esse projeto possível.

Agradeço a minha família pelo incentivo e total apoio que me prestaram durante todo o curso. Agradeço a minha namorada Janice que esteve sempre pronta a me ajudar e apoiar em todos os momentos com muito companheirismo, sempre dando bons conselhos.

Agradeço aos meus amigos e colegas que de alguma forma estiveram presentes e contribuíram para que eu pudesse me formar.

Agradeço aos gerentes da empresa onde trabalho pelos dias de folga, férias e flexibilidade de horários que permitiram com que pudesse realizar todas as etapas deste curso, Vera Lúcia Teixeira, Rodrigo Magrin e Rosângela Schenkel, sempre entenderam o meu lado e prestaram sua colaboração.

Agradeço aos engenheiros Raul Fernando Ribeiro da Silva, Albano Linck, Matheus Martins, Fabiano Brandão, Marco Gobbo e ao estagiário Adriano Dias pois graças a vocês esse trabalho se tornou possível, me receberam da melhor maneira possível em sua empresa e me prestaram auxílio a todo instante. Agradeço em especial ao engenheiro Gutter Da Rodda que doou o seu incrível talento e conhecimento para que este trabalho fosse possível, desde a sugestão do tema até os momentos em que foram apresentadas dificuldades se demonstrando sempre disponível e interessado na realização deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos que aceitou ser meu orientador e me prestou auxílio na elaboração deste trabalho com sua experiência e agradeço também ao Prof. Dr. Valner João Brusamarello que me auxiliou neste trabalho com o seu conhecimento.

RESUMO

Atualmente a demanda por energia elétrica tem crescido muito e o projeto das redes de distribuição primária e secundária em um sistema de distribuição de energia elétrica vem se tornando mais extenso e mais complexo. A tecnologia avança rapidamente e apesar de um sistema de distribuição manter sua forma básica no que se diz respeito ao seu projeto, seus elementos e componentes se atualizam com o tempo e sofrem melhorias trazendo benefícios. Investir em novas tecnologias nessa área pode trazer grande retorno para a concessionária de energia elétrica responsável pelo projeto e manutenção da rede de distribuição, pois evita custos no que se refere a troca de equipamentos e gastos com equipes de manutenção para reparo. Dentro desse contexto, um problema específico que surge é a utilização de conectores do tipo cunha para realizar a conexão entre o condutor de saída do transformador de distribuição e o condutor multiplexado isolado que faz a distribuição da energia em baixa tensão. Esse conector apresenta alguns problemas por necessitar de ferramentas específicas para sua instalação e pela necessidade de recompor a isolação, o que ocasiona em uma demora maior na execução do serviço gerando custos indesejados. Uma alternativa que se tem nesse caso é a utilização de conectores do tipo perfurante que são disponibilizados com isolação e de fácil instalação. Dessa maneira o tempo de instalação seria menor trazendo economia para a concessionária de energia. A questão é que o conector do tipo perfurante não é utilizado para este caso e não se sabe se ele apresenta bom desempenho para essa aplicação. Este trabalho tem como objetivo justamente verificar se esse tipo de conector pode ser utilizado para esta aplicação e para isso serão realizados ensaios, e seus resultados analisados para ser emitido parecer sobre sua utilização ou não. Terão como base os métodos para realização desses ensaios e validação do conector, normas técnicas brasileiras que regulamentam esses procedimentos. A norma porém não cita conectores do tipo perfurante, por isso será adaptada para este estudo caso.

Palavras-chave: Conectores, Ensaios, Redes de Distribuição.

ABSTRACT

Currently the demand for electricity has grown a lot and the design of Smart Grids primary and secondary in a system of power distribution has become more extensive and more complex. Technology moves quickly and despite a distribution system to maintain its basic form as it relates to your project, its elements and components are updated with time and experience improvements benefiting. Invest in new technologies in this area can bring big returns for the power company responsible for the design and maintenance of the distribution network, it avoids costs in relation to equipment change and expenditures with maintenance crews to repair. Within this context, a specific problem that arises is the use of wedge type connectors to make the connection between the driver output and the distribution transformer multiplexed insulated conductor which makes the distribution of power at low voltage. This connector has some problems require specific tools for their installation and the need to restore the insulation, which results in a longer delay in the execution of the service generating unwanted costs. An alternative that has been in this case is the use of the piercing type connectors that are provided with insulation and easy installation. Thus the installation time would be less bringing savings to the utility company. The issue is that the piercing connector type is not used for this case and it is unclear if he performs well for this application. This paper aims to precisely check if this type of connector can be used for this application and that testing should be performed, and the results were analyzed to be issued opinion on its use or not. Will be based on the methods for carrying out such tests and validation of the connector, Brazilian technical standards governing these procedures. The standard however does not mention the piercing type connectors, so it will be adapted for this case study.

Keywords: Connectors, Tests, Smart Grids.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico de potência 11
Figura 2 – Saída do transformador rebaixador MT-BT com a rede multiplexada 14
Figura 3 – Visão microscópica de um contato elétrico 15
Figura 4 – Conector de cruzamento 18
Figura 5 – Conector estribo de parafuso 19
Figura 6 – Conector paralelo de parafuso 20
Figura 7 – Conector perfurante com 4 saídas 20
Figura 8 – Conector terminal a compressão por parafuso 21
Figura 9 – Conector tipo cunha para ramal de ligação 22
Figura 10 – aplicação do conector tipo cunha para ramal de ligação 24
Figura 11 – Cruzamento de rede multiplexada com rede nua 26
Figura 12 – Cruzamento de redes multiplexadas 26
Figura 13 – Cruzamento com seccionamento de redes multiplexadas 27
Figura 14 – Cruzamento com seccionamento de redes multiplexadas 27
Figura 15 – Conector do tipo perfurante instalado 28
Figura 16 – Detalhes de um conector tipo perfurante 29
Figura 17 – Composição interna do conector tipo perfurante 30
Figura 18 – Derivação 32
Figura 19 – Deterioração de conexão por elevação de temperatura 34
Figura 20 – Circuito de ensaio 35
Figura 21 – Circuito montado 43
Figura 22 – Conector do circuito instalado 44
Figura 23 – Modelo elétrico 45
Figura 24 – Visão interna do conector 47
Figura 25 – Modelo elétrico do trecho de conexão 48
Figura 26 – Trecho de conexão ideal 49
Figura 27 – Modelo elétrico do circuito de ensaio 51
Figura 28 – Modelo térmico 53
Figura 29 – Posição da câmera de termovisão 58
Figura 30 – Termopares 59
Figura 31 – Gráfico de temperaturas em regime permanente 61

Figura 32 – Gráfico das sobre-elevações de temperatura em regime permanente 63
Figura 33 – Gráfico de temperaturas em regime de sobrecarga 65
Figura 34 – Gráfico das sobre-elevações de temperatura em regime de sobrecarga..... 67
Figura 35 – Imagem térmica do circuito de ensaio 67
Figura 36 – Imagem ampliada do conector 68
Figura 37 – Imagem focada no conector nome da figura 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distância entre conectores e tomadas de potencial..... 36
Tabela 2 – Corrente de aquecimento requerida para temperatura de 120ºC 38
Tabela 3 – Condutores de saída do transformador à rede secundária 40
Tabela 4 – Condutor tronco de circuitos secundários..... 41
Tabela 5 – Tamanho dos condutores 42
Tabela 6 – Análogos elétricos de campos térmicos..... 52
Tabela 7 – Medidas da temperatura em regime permanente 60
Tabela 8 – Sobre-elevações de temperatura em regime permanente..... 62
Tabela 9 – Medidas da temperatura em regime de sobrecarga 64
Tabela 10 – Sobre-elevações de temperatura em regime de sobrecarga 66

LISTA DE SIGLAS

SE – Subestação

ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica

ET – Estação Transformadora.

LT – Linha de Transmissão

NA – Normalmente Fechada

NF – Normalmente Aberta

BT – Baixa Tensão

MT – Média Tensão

AT – Alta Tensão

TC – Transformador de corrente

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO **11**
1.1. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO **12**
2. CONEXÃO ELÉTRICA **13**
2.1. CONECTORES **17**
2.1.1. Conector de cruzamento **17**
2.1.2. Conector estribo de parafuso **18**
2.1.3. Conector paralelo de parafuso **19**
2.1.4. Conector perfurante com 4 saídas **20**
2.1.5. Conector terminal a compressão por parafuso **21**
2.1.6. Conector tipo cunha para ramal de ligação **22**
2.1.7. Conector tipo perfurante **25**
3. ENSAIOS EM CONECTORES **31**
3.1. ENSAIOS DE CICLOS TÉRMICOS **32**
3.1.1. Circuito de ensaio **34**
4. ESTUDO DE CASO **40**
5. MODELOS TEÓRICOS **45**
5.1. MODELO ELÉTRICO **45**
5.2. MODELO TÉRMICO **52**
6. RESULTADOS **57**
6.1. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA **57**
6.2. ENSAIO EM REGIME PERMANENTE **59**
6.3. ENSAIO EM REGIME DE SOBRECARGA **64**
6.4. IMAGENS TÉRMICAS **67**
7. CONCLUSÕES **70**
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **71**

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a demanda por energia elétrica têm crescido muito, tanto por parte da classe industrial como por parte da classe comercial e residencial. É necessário à concessionária de energia elétrica fornecer energia de qualidade para os seus usuários que são exigentes e cientes dos seus direitos, além da forte regulamentação que existe sobre o sistema elétrico brasileiro realizada pela ANEEL.

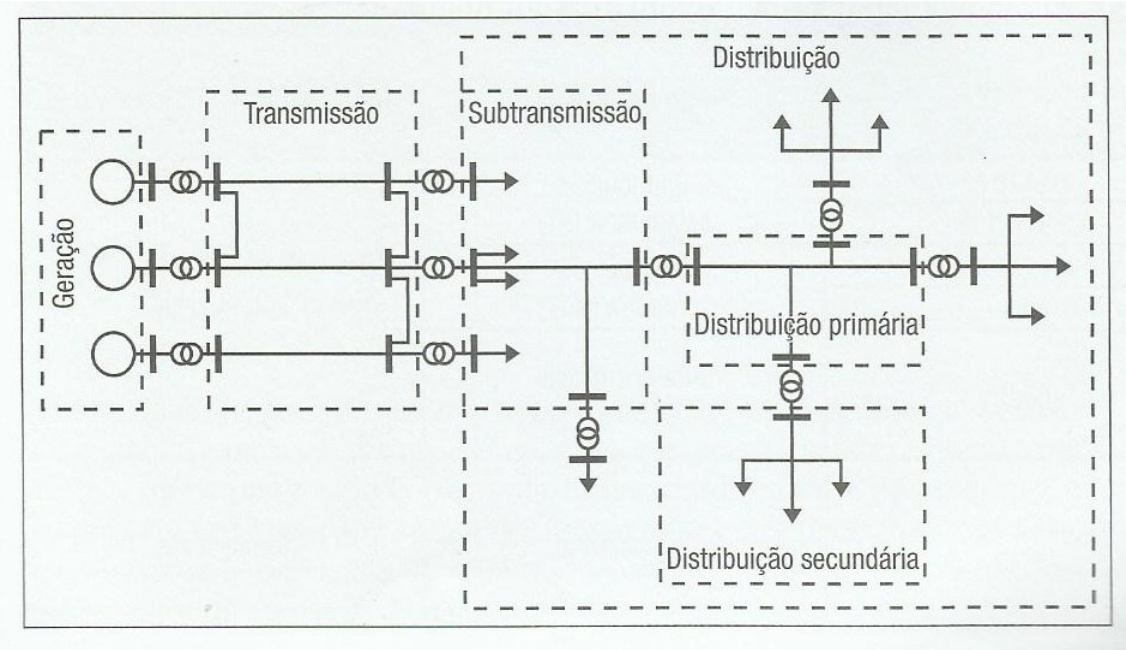
Para que se possa levar a energia elétrica até o seu usuário final existe todo um sistema, o sistema elétrico brasileiro, que independente de qual seja a sua fonte de energia irá possuir a seguinte configuração:

GERAÇÃO – TRANSMISSÃO – DISTRIBUIÇÃO.

A etapa de geração consiste basicamente na transformação de algum tipo de energia, seja ela hidráulica, térmica, ou alguma outra em energia elétrica. A etapa de transmissão é responsável pelo transporte da energia. Normalmente os centros de geração estão distantes dos centros de consumo por vários quilômetros. A etapa de distribuição faz a distribuição da energia elétrica recebida pelo sistema de transmissão até o usuário final.

Neste trabalho será estudado um problema específico que ocorre em um sistema de distribuição e será estudado mais especificamente no subcapítulo a seguir. Na Figura 1 é possível observar o diagrama unifilar do sistema elétrico de potência.

Figura 1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico de potência



Fonte: Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica [1]

1.1.SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

As linhas de transmissão operam em alta tensão para que a corrente que circule pelos cabos seja menor e as perdas ôhmicas que dependem do comprimento do condutor sejam reduzidas. As tensões normalmente utilizadas são de 138kV, 230kV, 345kV e 500kV.

Dentro do sistema de distribuição existe o sistema de subtransmissão, ele é responsável por captar a energia elétrica das subestações de subtransmissão e transferi-las para às SEs de distribuição e aos consumidores, em tensão de subtransmissão, através de linhas trifásicas operando em tensões usualmente, de 138kV, 69kV ou em casos mais raros em 34,5kV. Os usuários que consumem energia na tensão de subtransmissão normalmente são grandes plantas industriais ou estações de tratamento e bombeamento de água.

As SEs de distribuição, que são supridas pela rede de subtransmissão, são responsáveis pela transformação da tensão de subtransmissão para a de distribuição primária. Há inúmeros arranjos de SEs possíveis, variando com a potência instalada na SE.

As redes de distribuição primária, ou de média tensão, emergem das SEs de distribuição e operam, no caso de rede aérea , radialmente, com possibilidade de transferência de blocos de carga entre circuitos para o atendimento da operação em conduções de contingêngia, devido a manutenção corretiva ou preventiva. Os troncos dos alimentadores empregam usualmente uma tensão de 13,8kV. Estas redes atendem aos consumidores primários e aos transformadores de distribuição, estações transformadoras, ETs, que suprem a rede secundária, ou de baixa tensão. Dentre os consumidores primários destacam-se as indústrias de porte médio, shopping centers e instalações de iluminação pública. Podem ser aéreas ou subterrâneas, as primeiras de uso mais difundido pelo seu menor custo, e as segundas, encontrando grande aplicação em áreas de maior densidade de carga.

As redes aéreas são construídas utilizando-se postes, de concreto, em zonas urbanas, ou de madeira tratada, em zonas rurais, que suportam, em seu topo, a cruzeta, usualmente em madeira, com cerca de dois metros de comprimento, na qual são fixados os isoladores de pino. Utilizam-se condutores de alumínio com alma de aço, CAA, ou sem alma de aço, CA, nus ou protegidos. Em algumas situações particulares, utilizam-se condutores de cobre. Os cabos protegidos contam com capa externa de material isolante que se destina à proteção contra contatos ocasionais de objetos, por exemplo, galhos de árvores, sem que se destine a isolar os condutores.

As redes primárias contam com um tronco principal do qual se derivam ramais, que usualmente são protegidos por fusíveis. Dispõem de chaves de seccionamento, que operam

na condição normal fechadas (NF), que se destinam a isolar blocos de carga, para permitir sua manutenção corretiva ou preventiva. É usual instalar-se num mesmo circuito ou entre circuitos diferentes, chaves que operam normalmente abertas (NA), que podem ser fechadas em manobras de transferência de carga.

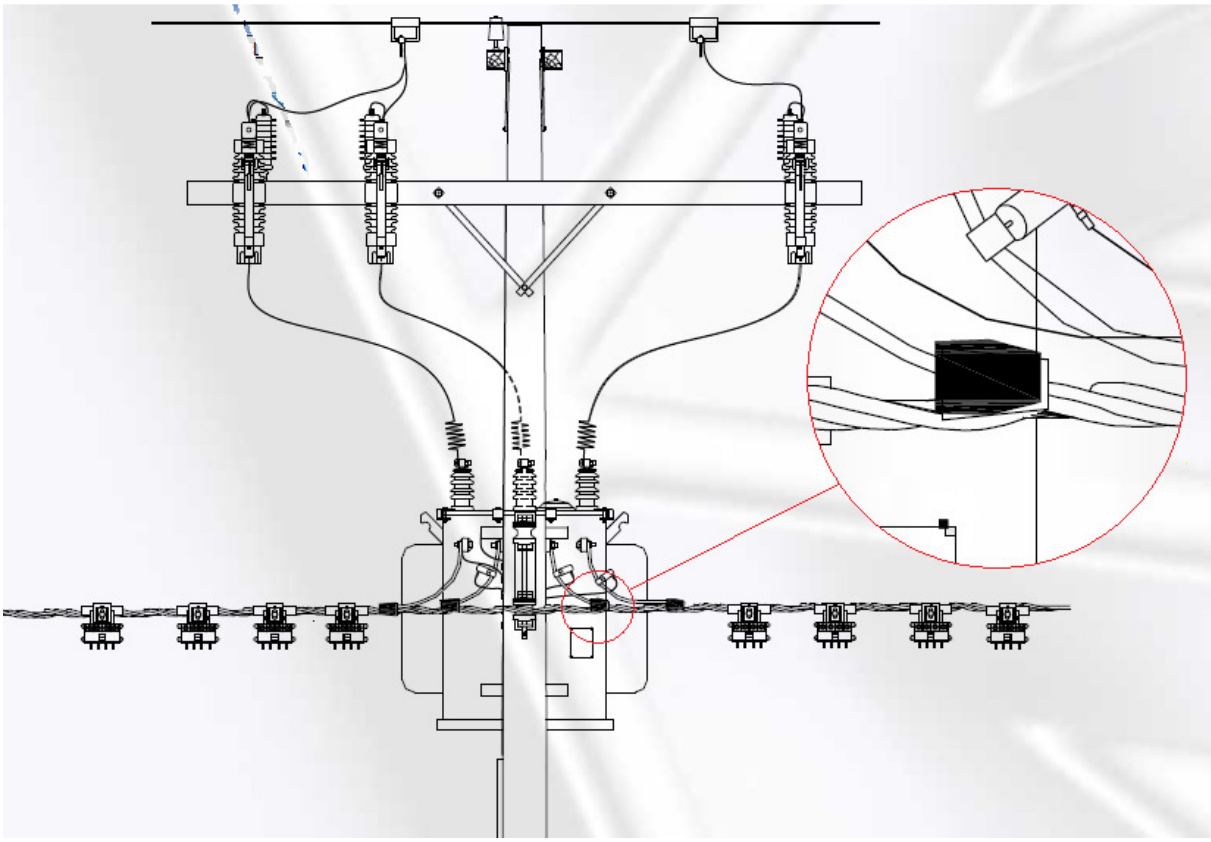
As estações transformadoras, ETs, são constituídas por transformadores, que reduzem a tensão primária, ou média tensão, para a de distribuição secundária, ou baixa tensão. Contam, usualmente, com pára-raios, para a proteção contra sobretensões, e elos fusíveis para a proteção contra sobrecorrentes, instalados no primário. De seu secundário deriva-se, sem proteção alguma, a rede secundária. Nas redes aéreas utilizam-se, usualmente, transformadores trifásicos, instalados diretamente nos postes, Em geral, suas potências nominais são fixadas na série padronizada, isto é, 10kVA, 15kVA, 30kVA, 45kVA, 75kVA, 112,5kVA e 150kVA.

No Brasil, a tensão de distribuição secundária está padronizada nos valores 220/127V e 380/220V, havendo predomínio da primeira nos estados das regiões sul e sudeste e da segunda no restante do país. O esquema mais usual consiste na utilização de transformadores trifásicos, com resfriamento a óleo, estando os enrolamentos do primário ligados em triângulo e os do secundário em estrela, com centro estrela aterrado. Utilizam-se ainda, em alguns sistemas, transformadores monofásicos e bancos de transformadores monofásicos.

Da ET, deriva-se a rede de baixa tensão, 220/127V ou 380/220V, que pode operar em malha ou radial, e que supre os consumidores de baixa tensão, consumidores residenciais, pequenos comércios e indústrias. Alcança, por circuito, comprimentos da ordem de centenas de metros. Destaca-se o predomínio, nesta rede, de consumidores residenciais.

A conexão elétrica entre o condutor empregado na ligação do borne de BT dos transformadores até a rede secundária é realizada atualmente por meio de conectores do tipo cunha. Na Figura 2 é possível observar esta conexão. O conector tipo cunha está com uma camada de cor preta que se refere a isolação feita por uma camada de fita isolante auto aglomerante e outra de fita isolante comum. A rede de MT se localiza sempre na parte superior da cruzeta, as 3 fases se conectam ao transformador no borne de entrada. No borne de saída do transformador está presente a conexão com rede multiplexada de BT.

Figura 2 – Conexão da saída do transformador rebaixador MT-BT com a rede multiplexada



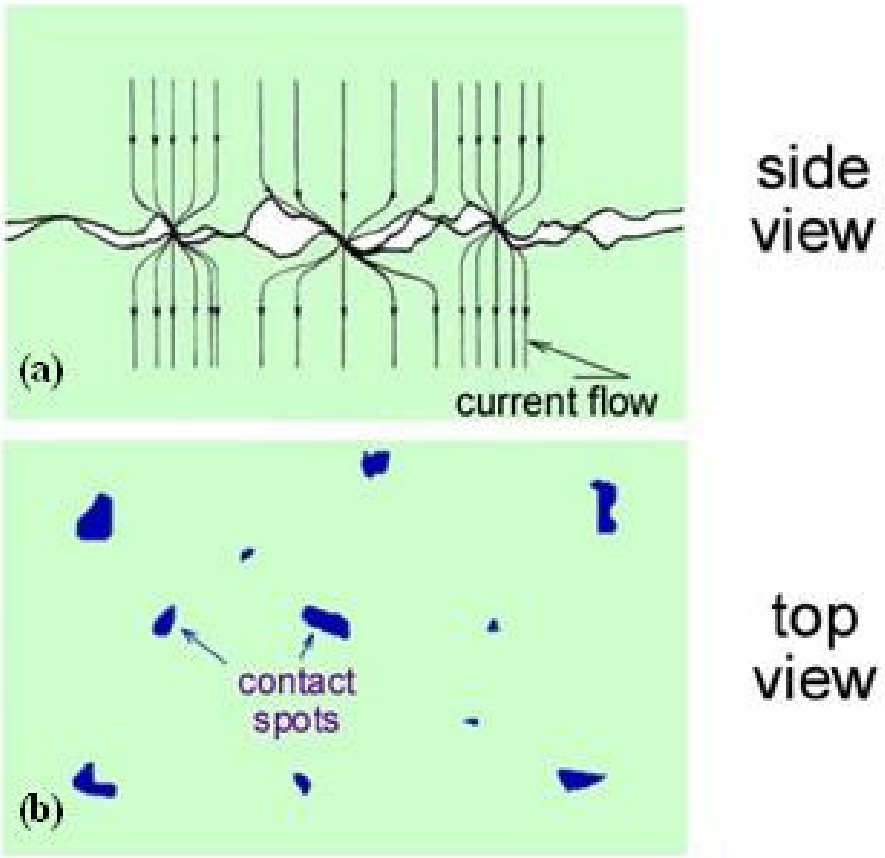
Fonte: Apresentações Cursos CETAF [2]

2. CONEXÃO ELÉTRICA

O objetivo de uma conexão elétrica é permitir que flua corrente elétrica de um condutor para outro através de uma área de contato entre eles. Vários parâmetros influenciam na qualidade de uma conexão elétrica como área de contato, pressão e rugosidade.

A olho nú uma superfície polida tem a aparência de ser lisa, porém sabe-se que todas as superfícies a nível microscópicos são rugosas, portanto a área de contato existente entre dois condutores não é a mesma que aparenta ser. Apesar da área parecer grande, apenas alguns pontos entre os metais estão efetivamente contactados, e a área real de contato consiste na soma desses pontos. Na figura 3 é possível obervar uma ilustração do que seria uma visão microscópica de um contato elétrico, repara-se que a corrente flui apenas por pequenos pontos de contatos.

Figura 3 – visão microscópica de um contato elétrico



Fonte: The Connector TekNote [3]

Ao se aumentar a pressão exercida entre os condutores, estes pontos também aumentam, aumentando consequentemente a área real de contato. Se um material possuisse uma dureza infinita os pontos de contatos seriam apenas 3. Porém todos os materiais possuem

maleabilidade e ao se exercer pressão entre dois materias eles sofrem deformação e os pontos de contatos aumentam. A equação 1 fornece uma expressão para a área real de contato [4].

$$A = \frac{P}{\varepsilon \mathrm{H}} \tag{1}$$

A variável "P" representa a força mecânica exercida entre os metais do contato, "ε" uma constante de proporcionalidade e "H" representa a duzera do material. Analisando essa equação pode-se deduzir que ao aumentar a força mecânica no contato e diminuir a duzera do material, aumenta a área real de contato.

Cada ponto de contato possui uma pressão diferente, tomando-se a pressão média dos pontos de contato "p" e multiplicando pela área de contato real "A" chega-se na equação 2 que é outra forma de representar a força mecânica exercida no contato [4].

$$\mathrm{P} = pA \tag{2}$$

A corrente elétrica é obrigada a fluir por meio dos pontos de contato, essa constrição acaba por gerar uma resistência, chamada de resistência de constrição. O valor dessa resistência depende no número de pontos de contato e também da resistividade dos metais contactados e pode ser obtida pela equação 3 [4].

$$R = \frac{e_1 + e_2}{4na} \tag{3}$$

Quanto menor a resistividades "e_1" e "e_2" dos metais e maior a quantidade de pontos de contato "n", menor será a resistência de constrição. A variável "a" é o raio médio dos pontos de contato.

A oxidação dos metais é um efeito nocivo a ser considerado nas conexões elétricas, pois a camada óxida possui certa resistividade acrescentando uma resistência adicional a resistência de contato. Pode-se dizer que a resistência total de contato é a soma da resistência de constrição devida a limitação de área imposta pelos pontos de contato somada a resistência elétrica da camada óxida. Para que se reduza a resistência devido a camada óxida é necessário fazer a máxima limpeza dos contatos.

Outra questão que deve ser observada em conexões elétricas é o efeito da corrosão galvânica, ela ocorre sempre que dois tipos de metais diferentes são colocados em contato. Cada metal possui um potencial eletrolítico e estando os dois metais em presença de solução contendo sal ionizado, ocorre a corrosão do metal de menor potencial eletrolítico. A corrosão galvânica possui um efeito nocivo sobre as conexões elétricas pois reduz a área de contato entre os metais e com o tempo desfaz a conexão. Para evitar este efeito, muitos metais passam por processo de galvanização para serem revestidos por uma camada de um metal menos nobre, desta maneira, a corrosão ocorre no metal menos nobre protegendo o outro metal.

2.1. CONECTORES

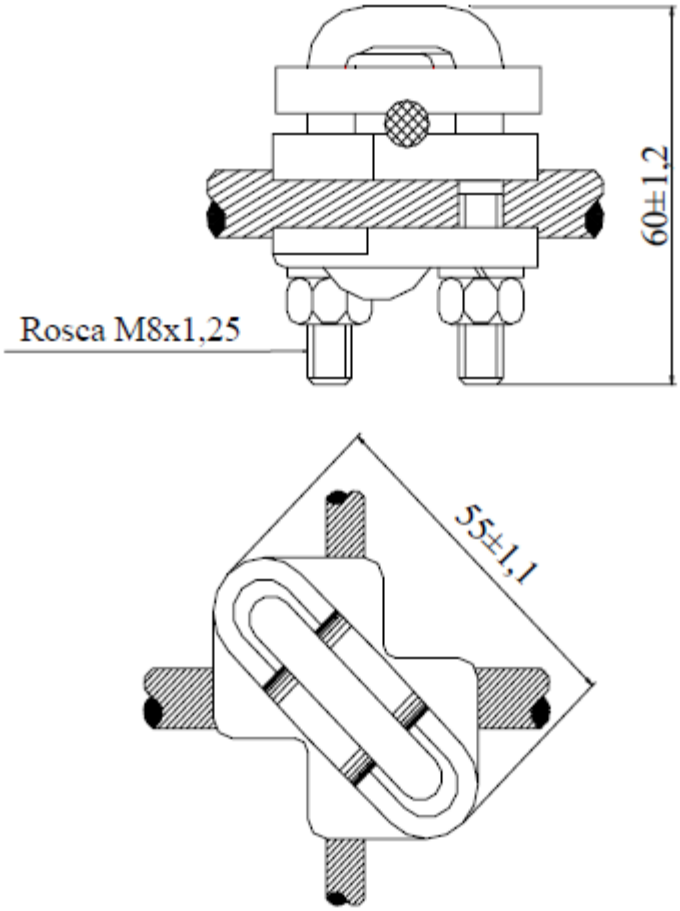
Existem vários tipos de conectores no mercado, normalmente a escolha do conector é realizada com base em alguns quesitos: o tamanho da seção dos condutores que devem ser interligados e o nível de tensão da isolação da rede e a configuração da conexão.

Atualmente, existe a tendência de que todas as novas redes de distribuição, por questões de segurança e confiabilidade sejam isoladas. Alguns conectores não possuem isolação, sendo necessário desencapar o condutor, instalar e conector e em seguida recompor a isolação. Outros conectores já possuem isolação, sendo revestidos por uma camada polimérica e estrutura metálica interna que faz a conexão. Cada configuração da rede irá determinar também o tipo de conector , pois cada um desempenha uma função diferente, vai depender se a conexão é destinada a um ramal de ligação, cruzamento ou submetido a tração, ligado diretamente a uma chave seccionadora por exemplo. A seguir serão apresentados os tipos mais comuns de conectores atualmente utilizados em uma rede de distribuição

2.1.1. Conector de cruzamento

O conector de cruzamento é utilizado para o caso específico em que há o cruzamento, perpendicular entre duas redes nuas secundárias. Existe um conector para cada fase formando um ângulo de 90º entre os condutores interligados. É possível observar o desenho do conector na Figura 4.

Figura 4 – Conector de cruzamento



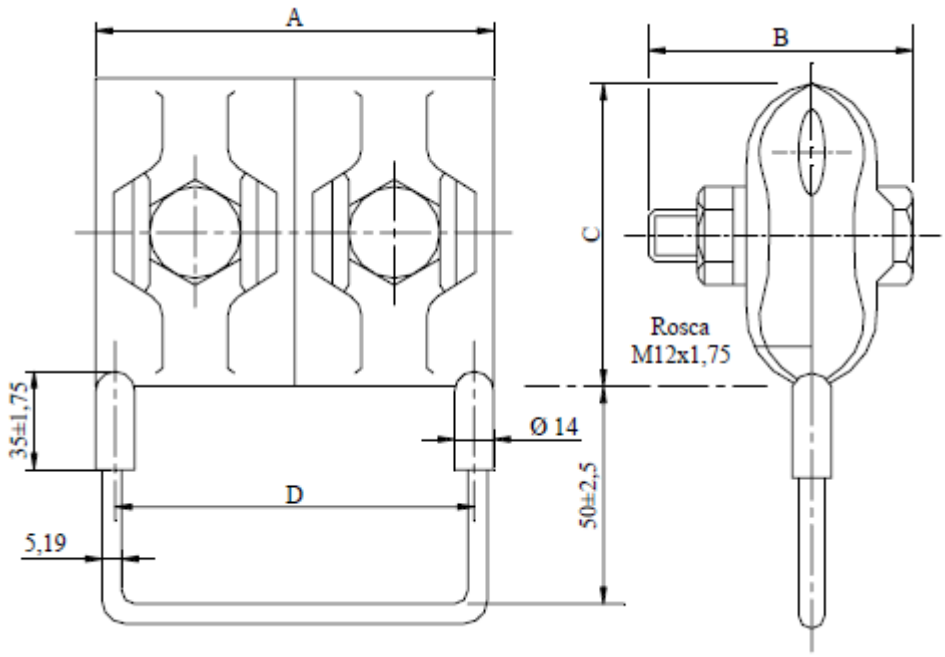
Fonte: PTD-00.001 [5]

Seu material é alumínio de primeira fusão, contendo no máximo 0,2% de cobre. O grampo deve ser de aço carbono ABNT 1010 a 1020, laminado ou trefilado e forjado. As arruelas de pressão devem ser do mesmo tipo de aço carbono, laminado. As partes ferrosas devem ser zincadas por imersão a quente, anodizadas e seladas com cromato.

2.1.2. Conector estribo de parafuso

O conector estribo de parafuso é utilizado normalmente utilizado quando se deseja fazer alguma conexão com a rede primária, comumente utilizado para conectar a rede primária a entrada do transformador rebaixador de tensão MT-BT. Na Figura 5 é possível observar o desenho do conector.

Figura 5 – Conector estribo de parafuso



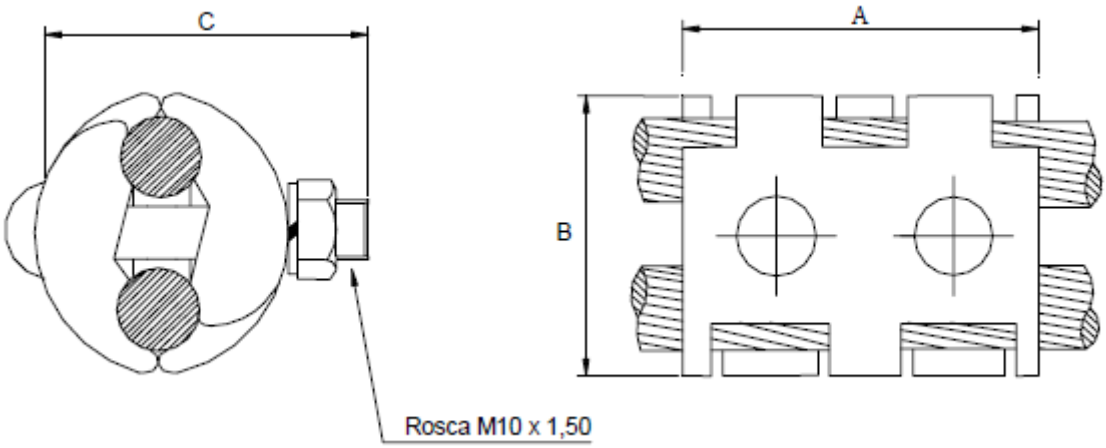
Fonte: PTD-00.001 [5]

Seu material é alumínio de primeira fusão, contendo no máximo 0,2% de cobre. Os parafusos devem ser de aço carbono ABNT 1010 a 1020, laminado ou trefilado e forjado. O estribo deve ser de cobre eletrolítico, tempera dura, estanhado. As arruelas de pressão e porcas devem ser do mesmo tipo de aço carbono, laminado. As partes ferrosas devem ser zincadas por imersão a quente, anodizadas e seladas com cromato.

2.1.3. Conector paralelo de parafuso

O conector paralelo de parafuso tem a mesma função do conector de cruzamento, porém o ângulo desejado ao invés de ser de 90°, é de 0º. Fazendo a conexão elétrica entre redes paralelas. O conector está ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Conector paralelo de parafuso



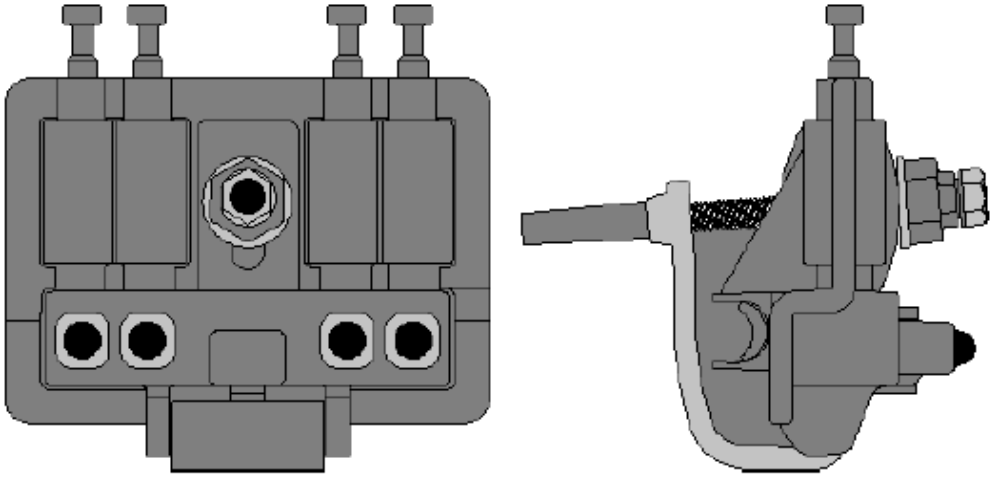
Fonte: PTD-00.001 [5]

Seu material é liga de cobre, contendo no mínimo 90% de cobre e no máximo 5% de zinco. O parafuso e porcas são de bronze silício e a arruela de pressão de bronze fosforoso.

2.1.4. Conector perfurante com 4 saídas

O conector perfurante com 4 saídas é utilizado na rede multiplexada, é utilizado um por fase, ele perfura a isolação do cabo e realiza a conexão elétrica. É utilizado para conectar um consumidor de baixa tensão a rede secundária. Um conector apenas possui quatro 4 saídas. É possível observar o conector pela Figura 7.

Figura 7 – Conector perfurante com 4 saídas



Fonte: PTD-00.001 [5]

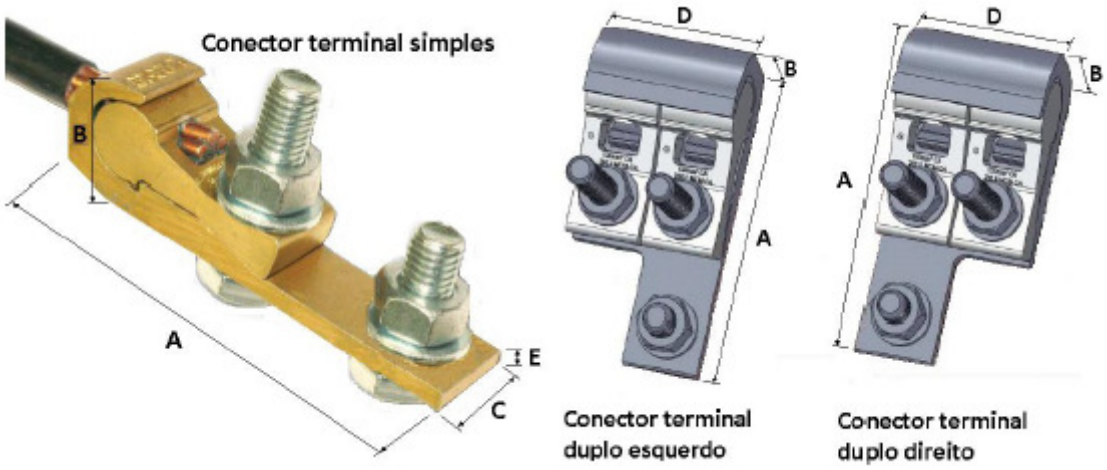
Seu material é em liga de alumínio com características mecânicas compatíveis com os esforços aplicados às peças, e características elétricas que favoreçam a continuidade elétrica e dissipação térmica. O corpo recebe uma cobertura plástica composto por náilon com fibra de vidro. Os terminais dentados que são os perfurantes, devem ser em cobre com uma camada mínima de estanho de 5µm. Barramento em liga de cobre com uma camada mínima de estanho igual a 8µm. Cabeça fusível em Zamac, em liga de aço com proteção superficial contra corrosão ou material polimérico. Parafuso, porca e arruelas em aço inoxidável austenítico tipo 316. Hastes, molas e chapa de acomodação em aço com proteção superficial contra corrosão. As hastes são plastificadas na região que ficará exposta. Prensa cabos em aço inoxidável austenítico tipo 316 ou alumínio anodizado. Vedação e luvas de isolação elétrica fabricadas em PVC flexível.

A imperbeabilidade dos conectores deve ser assegurada através dos materiais elastômeros apropriados e não deve ser baseada no emprego de graxas, gel, pastas, etc. Todas as partes metálicas acessíveis durante a montagem e após a instalação dos conectores, por construção estar fora de potencial.

2.1.5. Conector terminal a compressão por parafuso

O conector terminal a compressão por parafuso serve para conectar algum cabo da rede em alguma estrutura metálica, como na parte metálica de uma chave seccionadora por exemplo. Na Figura 8 está representado o conector.

Figura 8 – Conector terminal a compressão por parafuso



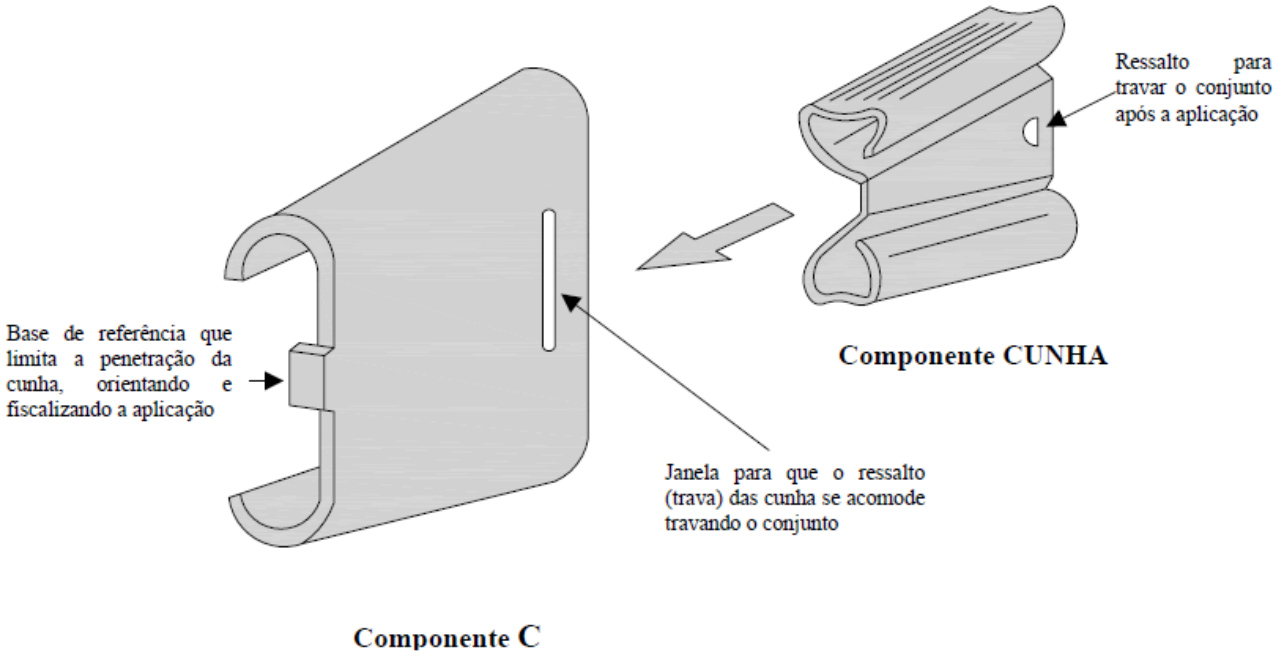
Fonte: PTD-00.001 [5]

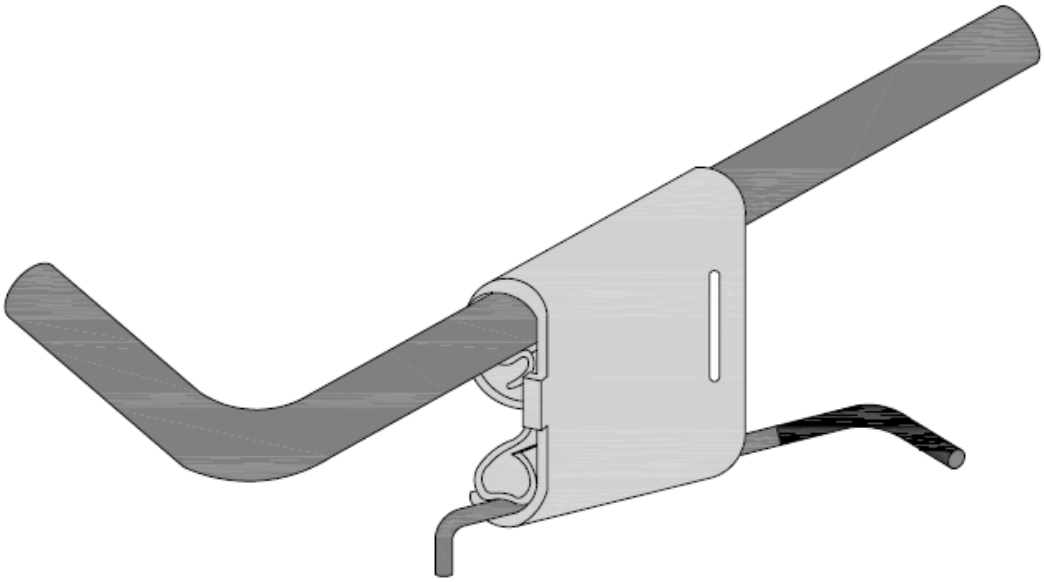
O corpo do conector deve ser em liga de alumínio extrudado, de primeira fusão, não recozido, com pureza mínima de 96%. Parafusos e arruelas em aço inoxidável. Porcas em latão estanhado. O conector terminal montado deve conter graxa antioxidante, a qual tem a função de proteger o contato elétrico.

2.1.6. Conector tipo cunha para ramal de ligação

Ramais de ligação são os condutores e acessórios compreendidos entre o ponto de conexão na rede de distribuição e o ponto de entrega. O conector é composto por duas partes, sendo o externo no formato de um "C" flexível, em liga de cobre estanhado, possuindo um orifício chamado de janela de travamento e o interno no formato de uma cunha flexível, em liga de cobre estanhado, com ranhuras nas laterais e possui uma saliência chamada de trava. O "C" e a cunha exercem uma força de pressão constante sobre os condutores pelo efeito mola. Ver Figura 9.

Figura 9- Conector tipo cunha para ramal de ligação





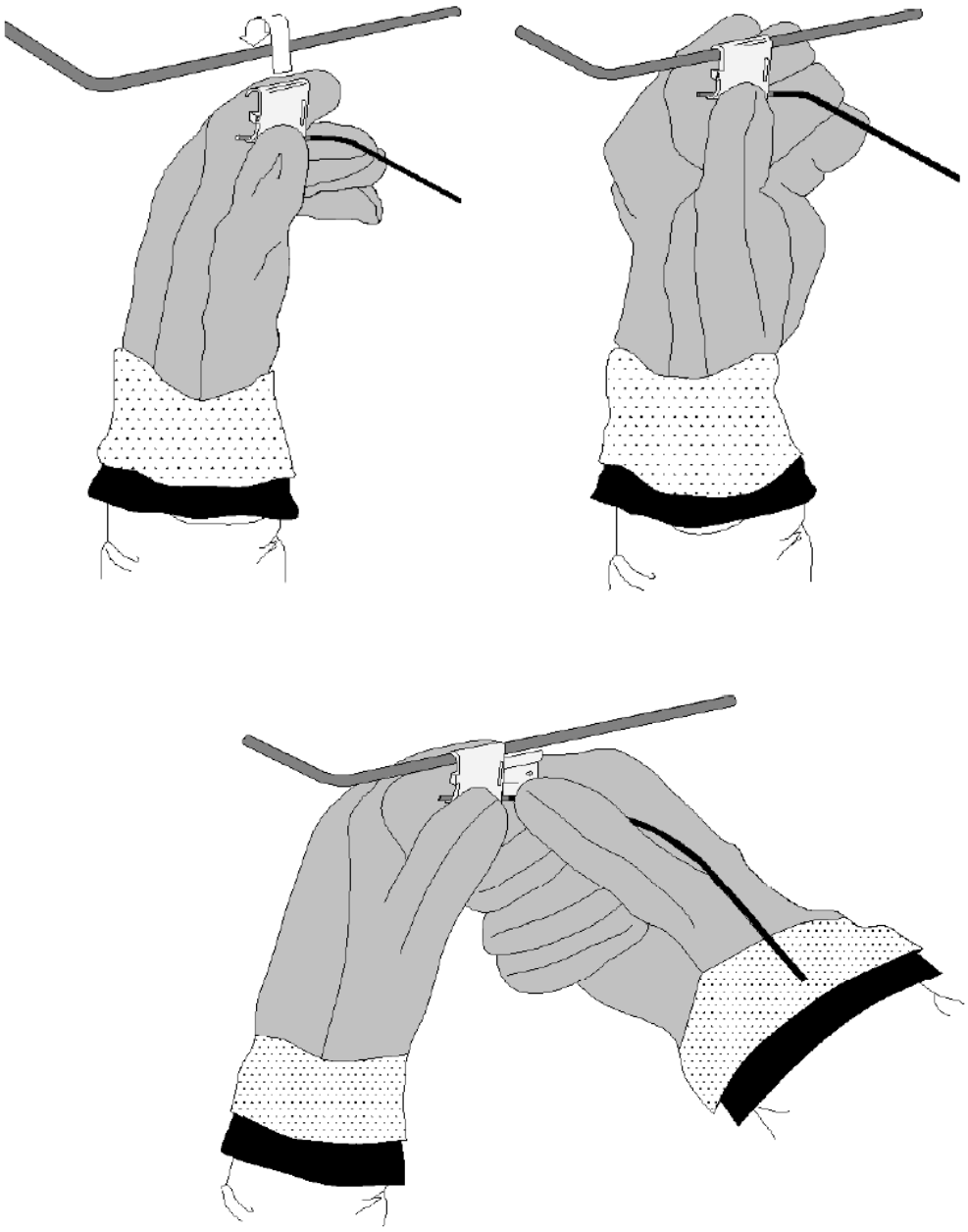
Fonte: NTD-00.049 [6]

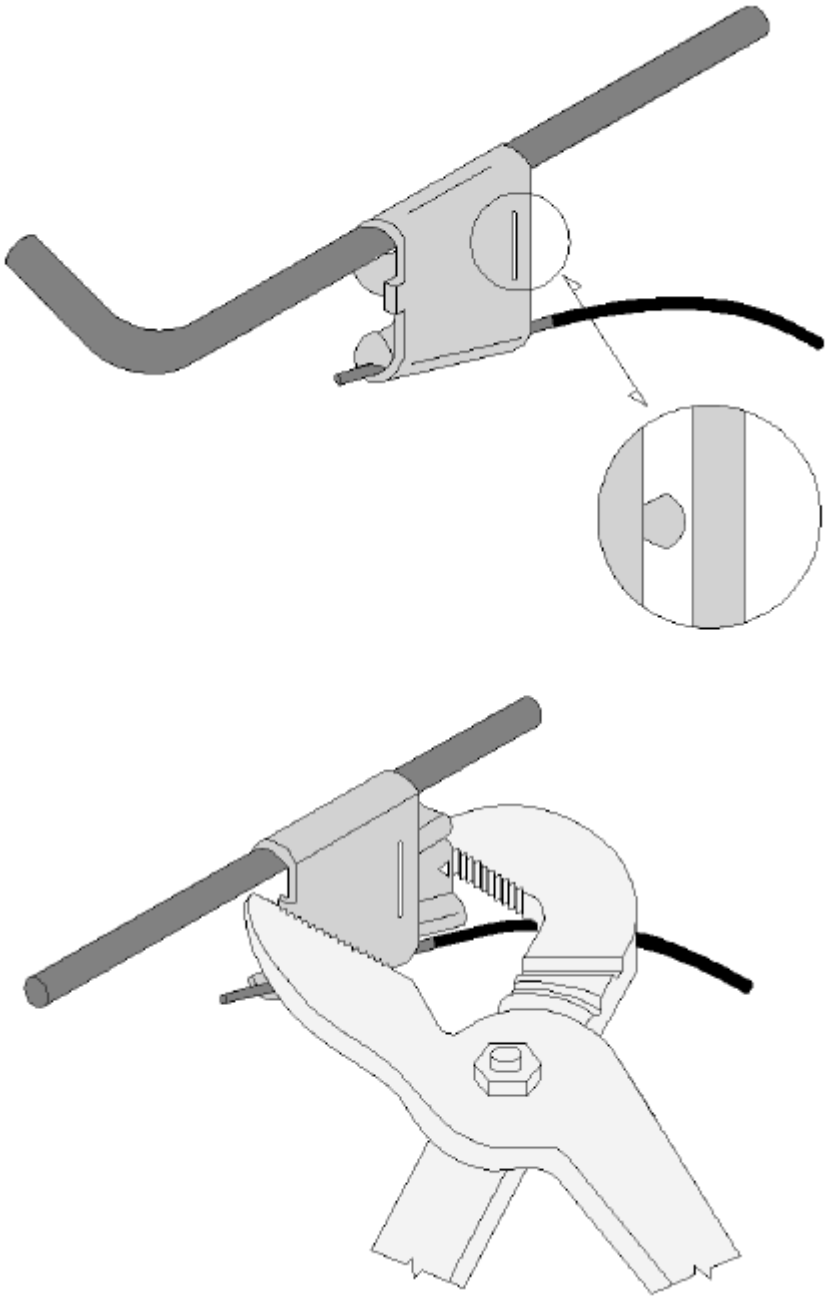
No caso de condutores isolados, deve-se preparar os condutores. A isolação da extremidade do condutor deve ser retirada num comprimento aproximadamente 1/3 maior do que o comprimento do conector que será empregado na conexão. Fazer o corte circular junto a marcação sobre a isolação dos condutores, tomando cuidado para não ferir o condutor, utilizando o canivete para eletricista. Fazer um corte longitudinal entre o corte circular e a extremidade do condutor, com a lâmina trabalhando paralela a superfície da isolação, até aparecer o condutor. Retirar a isolação. Em condutores de alumínio, limpar cuidadosamente a área de contato, se for o caso utilizar uma escova de aço a fim de retirar a camada de óxido existente [6].

Na aplicação do conector deve-se seguir alguns procedimentos. O instalador, sempre que possível, deve posicionar o componente "C" no condutor principal, de modo que a janela de travamento fique voltada para si, e que após a aplicação, possa conferir se houve travamento. A extremidade do condutor derivação deve ser introduzida no componente "C", no mesmo sentido de penetração da cunha, a fim de evitar deformação dos fios componentes do cabo, principalmente dos condutores multiplexados 10 e 16 mm² ou mesmo o cravamento da extremidade da cunha sobre o condutor, o que inviabilizaria a penetração da cunha. Introduzir a cunha em conjunto com o condutor de modo que a trava fique voltada para a lateral fechada do "C", prefixando o conjunto apenas com a pressão dos dedos. Para o início da aplicação do conector, a mordaça do alicate bomba d'água, que age sobre a parte traseira da cunha deve ser posicionada na lateral da mesma, e não no centro, evitando-se assim restrições na deformação

da cunha e outra parte do alicate deve ser colocada na parte dianteira do “C”. Algumas vezes, dependendo do tamanho do conector, serão necessárias duas regulagens no alicate, uma para o momento inicial e outra para o momento final, porém sempre buscando operá-lo com uma só mão. Verificar se a trava da cunha esta alojada dentro da janela do “C”, certificando-se da correta aplicação, a parte dianteira da cunha deve estar encostada na base de referência existente na frente do “C”. As fases de aplicação do conector estão demonstrados nos desenhos da Figura 10.

Figura 10 – aplicação do conector tipo cunha para ramal de ligação



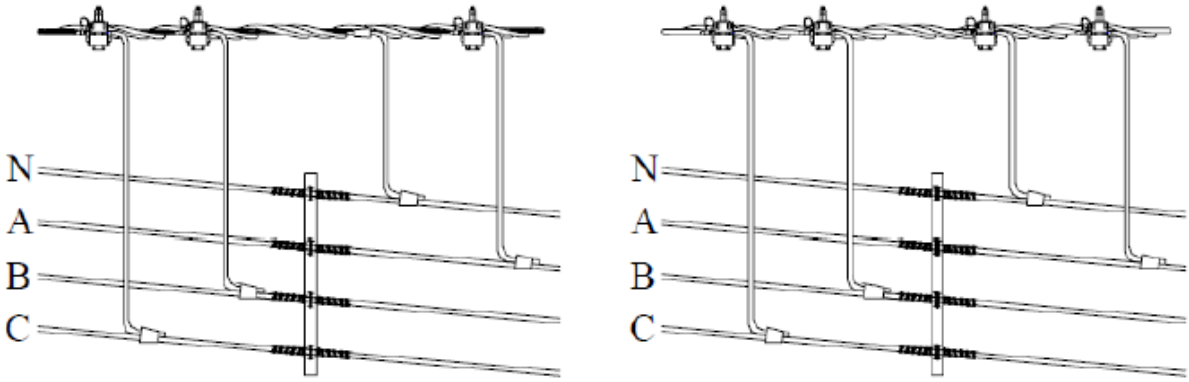


Fonte: NTD-00.049 [6]

2.1.7. Conector tipo perfurante

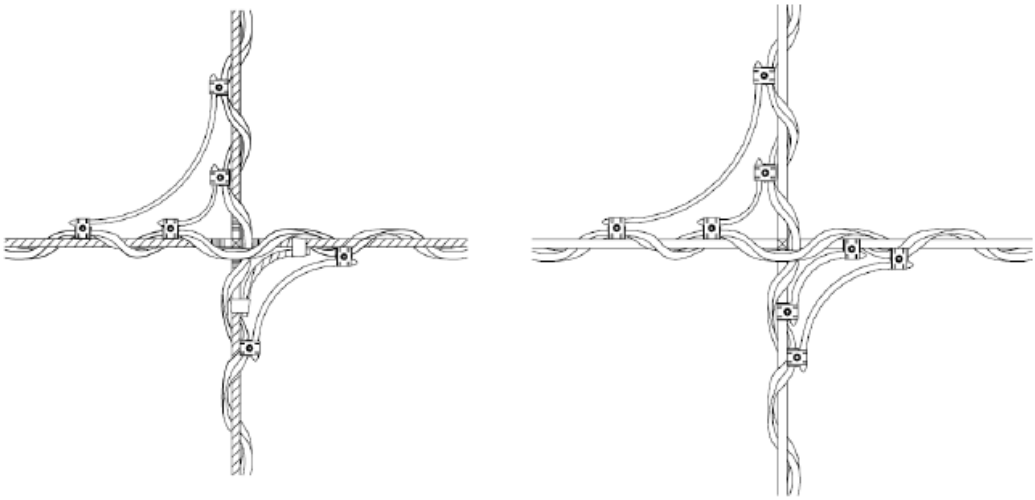
Para as aplicações em redes multiplexadas, onde os cabos possuem isolação, é utilizado conector do tipo perfurante. Utilizado principalmente em cruzamento de redes que envolva rede multiplexada. Como sua aplicação se dá entre redes secundárias, difere do conector perfurante de 4 saídas já descrito anteriormente que é utilizado para conectar um consumidor a rede secundária. Nas Figuras 11, 12 e 13 é possível observar algumas aplicações do conector tipo perfurante no cruzamento entre redes.

Figura 11 – Cruzamento de rede multiplexada com rede nua



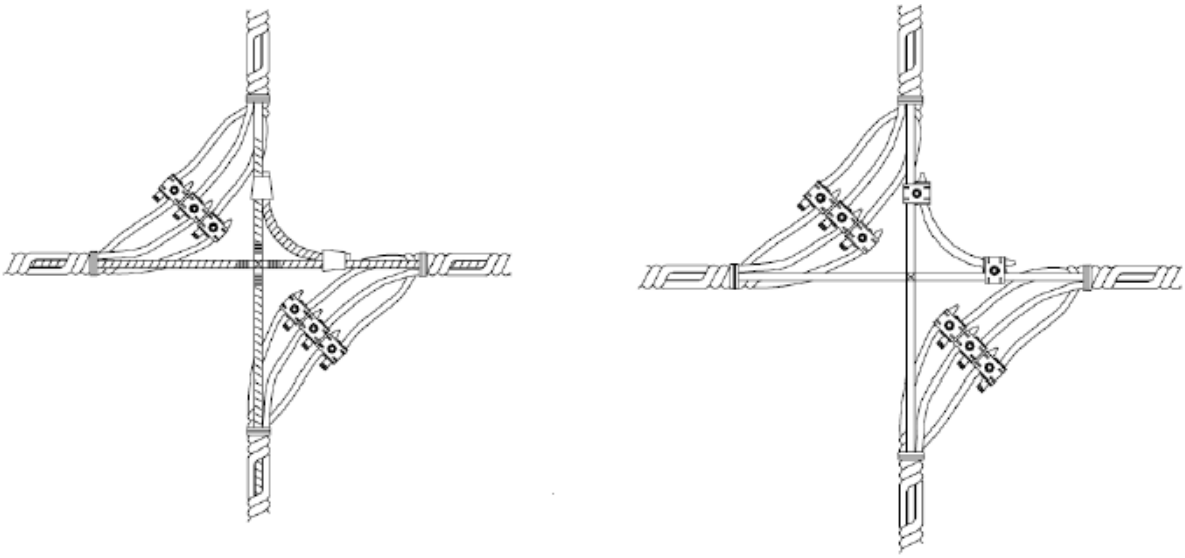
Fonte: Apresentações Cursos CETAF [2]

Figura 12 – Cruzamento de redes multiplexadas



Fonte: Apresentações Cursos CETAF [2]

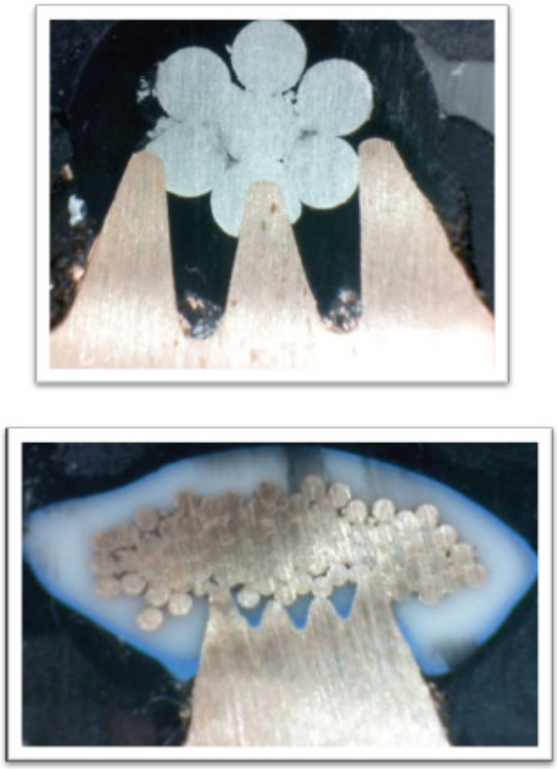
Figura 13 – Cruzamento com seccionamento de redes multiplexadas



Fonte: Apresentações Cursos CETAF [2]

O conector perfurante é composto por lâminas dentadas que perfuram a isolação do cabo e faz o contato elétrico desejado. Na figura 14 é possível observar um corte transversal realizado em conexões utilizando conector perfurante.

Figura 14 – corte transversal de conexão do tipo perfurante



Fonte: KRJ - catálogo do fabricante

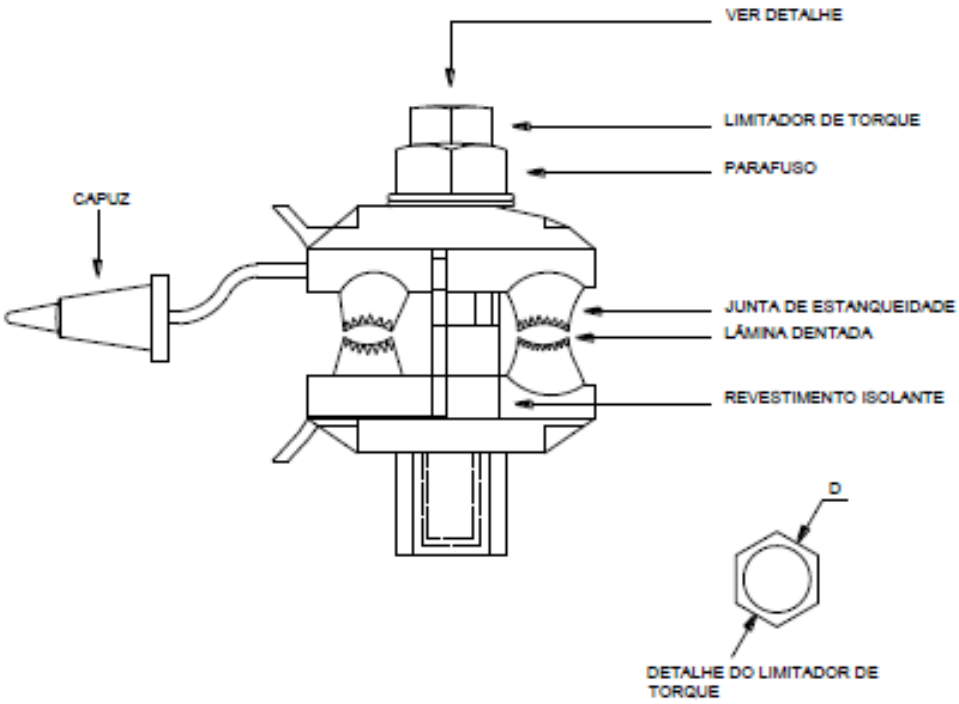
Sua aplicação é simples, pois basta rosquear um parafuso que une as partes superior e inferior do conector onde as lâminas estão acopladas. O torque exercido vai aproximando as duas partes até que os cabos sejam perfurados pelas lâminas dentadas e o contato elétrico se estabeleça. Inicialmente é necessário abrir o conector o suficiente para poder acomodar os condutores nas canaletas. Depois é necessário apertar o parafuso com a mão, até que o conector fixe o suficiente os condutores, para posteriormente concluir a instalação com a chave, observando que na região da conexão os condutores devem estar em paralelo. É necessário colocar o capuz na ponta do condutor derivado, tomando cuidado ao inseri-lo, pois uma força excessiva pode danificar sua isolação. Durante a aplicação do torque com a chave sextavada, é necessário assegurar-se de que os condutores estão alinhados com as canaletas do conector, observando também o posicionamento correto da chave, pois caso contrário a cabeça fusível do parafuso poderá romper, antes da aplicação do torque necessário. O torque com a chave deve ser efetuado até romper a cabeça fusível do parafuso. O rompimento indicará que o conector está devidamente instalado. É possível observar um conector do tipo perfurante já instalado na Figura 15.

Figura 15 – Conector do tipo perfurante instalado

Fonte: Incesa - catálogo do fabricante

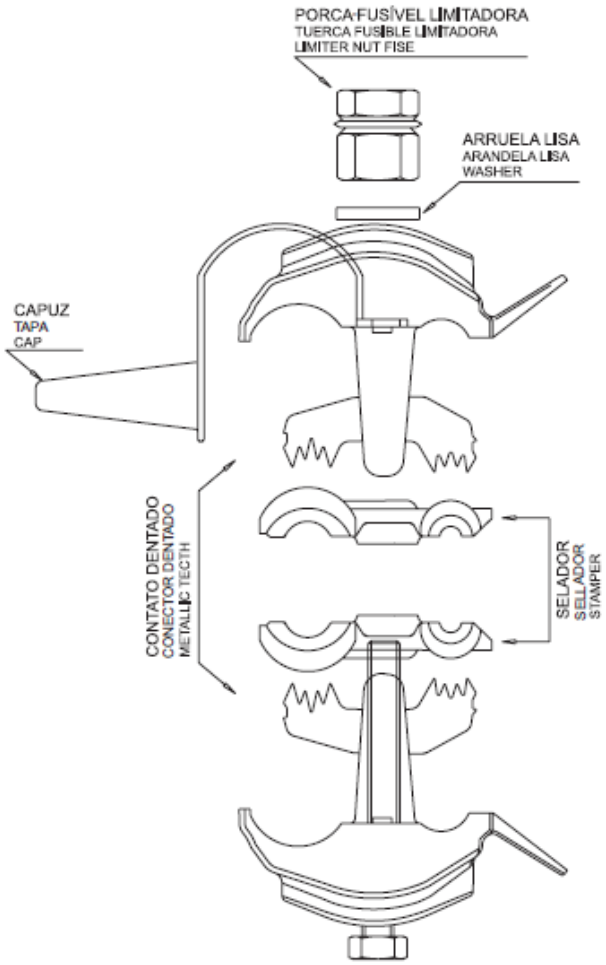
Este tipo de conector é utilizado em redes isoladas, por isso nenhuma parte metálica do condutor deve ficar exposta. O Capuz faz a isolação da extremidade de um dos condutores que foi seccionada. As juntas de estanqueidade têm a mesma função, elas são de material flexível e isolante, e cobrem justamente a parte da conexão na região das lâminas dentadas. Outra grande facilidade é o limitador de torque, pois quando se aperta o parafuso com chave e torque necessário é alcançado ela rompe. Dessa maneira evita que o instalador permita que o conector não fique firme e também que a força excessiva danifique o conector e os condutores. Nas Figuras 16 e 17 é possível observar com mais detalhes o conector.

Figura 16 – detalhes de um conector tipo perfurante



Fonte: PTD-00.001 [5]

Figura 17 – Composição interna do conector tipo perfurante



Fonte: Incesa - catálogo do fabricante

O material das lâminas dentadas é em liga de cobre estanhada. O capuz e junta de estanqueidade são compostos de elastômero. O parafuso é de aço zincado, aço inoxidável, liga de alumínio ou com travamento superior que atenda ao ensaio de resistência a corrosão. O revestimento isolante do conector é de material polimérico, na cor preta, resistente aos raios ultravioleta e isentos de trincas, fissuras, rebarbas, incrustações, graxas, gel e pastas. A impermeabilidade dos conectores deve ser assegurada através dos materiais elastômeros apropriados e não deve ser baseada no emprego de graxas, gel ou pastas. Todas as partes metálicas acessíveis durante a montagem e após a instalação dos conectores devem, por construção estar fora de potencial, e ser completamente isolado para 0,6/1kV. Cada conector deve conter, tanto no lado do tronco como na derivação, duas juntas isolantes de material elastômero, que deverá se auto ajustar ao isolante do condutor durante a conexão, tornando-a estanque e a prova de água.

3. ENSAIOS EM CONECTORES

Antes que se possa utilizar um conector na prática e instalá-lo na rede de distribuição é necessário realizar alguns ensaios para se certificar de que ele está apto a ser utilizado. Imagine uma concessionária de energia elétrica comprar um lote de conectores, instalá-los na rede e em seguida o mesmo se apresentar inadequado para a aplicação. Os inúmeros pontos de conexão da rede iriam apresentar problemas de elevação de impedância, superaquecimento, e por fim, rompimento da conexão. Seria de fato, um grande transtorno e um grande prejuízo para concessionária e para os seus consumidores. Ou seja, assim como qualquer outro dispositivo elétrico, os conectores também passam por ensaios que validem a sua utilização.

Existem vários tipos de ensaios aos quais os conectores devem ser submetidos, cada ensaio visando verificar seu desempenho para determinado efeito físico ou para cada caso onde possa sofrer diferentes tipos de solicitações elétricas, químicas ou mecânicas. Os ensaios existentes e citados em norma brasileira [7] são:

a) ciclos térmicos com curtos-circuitos;

b) névoa salina;

c) tensão de radiointerferência e corona;

d) determinação dos teores de cobre e dos elementos principais de liga;

e) verificação geral;

f) tração do conector;

g) torque dos parafusos;

i) tração com cunha nos parafusos;

j) condutividade da liga metálica;

k) aquecimento;

l) resistência elétrica;

m) efeito mecânico sobre o condutor-tronco;

n) espessura da camada de estanho, quando for o caso;

o) dureza em conectores de compressão.

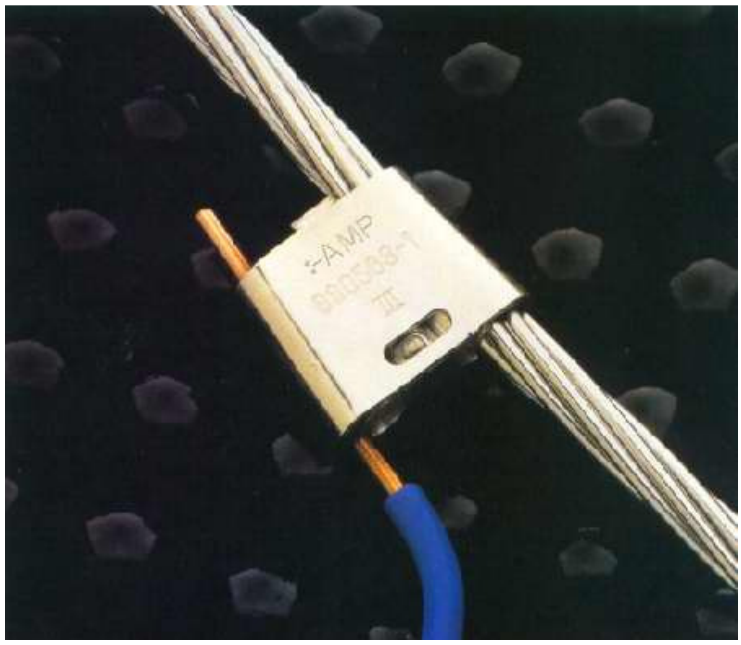
Segundo a NBR5370, os ensaios devem ser realizados em laboratórios oficiais ou reconhecidos pelo comprador e fica assegurado ao inspetor do comprador o direito de presenciar os ensaios, familiarizar-se com os equipamentos e instalações do laboratório, verificar e dirigir, se possível, as calibrações e ajustes de aparelhos e instrumentos de medidas, conferir resultados e exigir a repetição dos ensaios, se necessário, a seu critério. Fica ainda assegurado ao inspetor do comprador o direito de assistir a quaisquer das fases de

fabricação destes conectores. Dos ensaios citados, o mais crítico é o de ciclos térmicos com curtos-circuitos pois submete a conexão a um elevado estresse elétrico, térmico e mecânico. Por esta razão, será realizado este tipo de ensaio no conector do tipo perfurante.

3.1.ENSAIOS DE CICLOS TÉRMICOS

Não há norma brasileira que se aplique a conectores do tipo perfurante. As normas existentes que versam sobre os conectores e sobre os ensaios são as NBR5370 e NBR9326. A primeira versa sobre os conectores em um aspecto mais geral, trata de itens como projeção, fabricação, identificação e acondicionamento dos conectores, critérios que devem ser seguidos pelos fabricantes e alguns outros também pelo comprador. Já a NBR9326 é específica para o ensaio de ciclos térmicos e curtos-circuitos. Ela que especifica como devem ser executados os ensaios. Apesar de tais normas não se aplicarem a conectores do tipo perfurante, elas se aplicam a conectores de derivação em geral, ou seja, que fazem a conexão entre um condutor tronco, ou principal, a um condutor de derivação. Na Figura 18 é possível observar quando ocorre uma derivação, o condutor principal é sempre aquele que prossegue pelas duas extremidades do conector e o condutor de derivação é sempre aquele que prossegue apenas por uma de suas extremidades. Neste caso da Figura 18, o condutor de maior seção é o principal e o de menor seção é o de derivação. O contrário também pode ocorrer. Este conector utilizado para ilustrar uma derivação não é do tipo perfurante.

Figura 18 - Derivação



Fonte: Provitel - catálogo do fabricante

Como o princípio físico de um conector do tipo perfurante e o de um conector normal é o mesmo, e a aplicação do conector é a mesma para qual as normas estão definidas, elas servirão como base para o ensaio de conectores do tipo perfurante ainda que tenham sido criadas para conectores normais tendo em vista que não há norma brasileira para conector do tipo perfurante. Pela norma NBR5370 é montado um circuito com a utilização dos conectores e aplicada uma corrente que provoque aquecimento. É necessário deixar o circuito aquecido por essa corrente durante um determinado período de tempo. Após esse período a corrente deve ser desligada e aguardar até que o circuito volte a temperatura ambiente para aquecê-lo novamente, assim se consiste um ciclo térmico de envelhecimento.

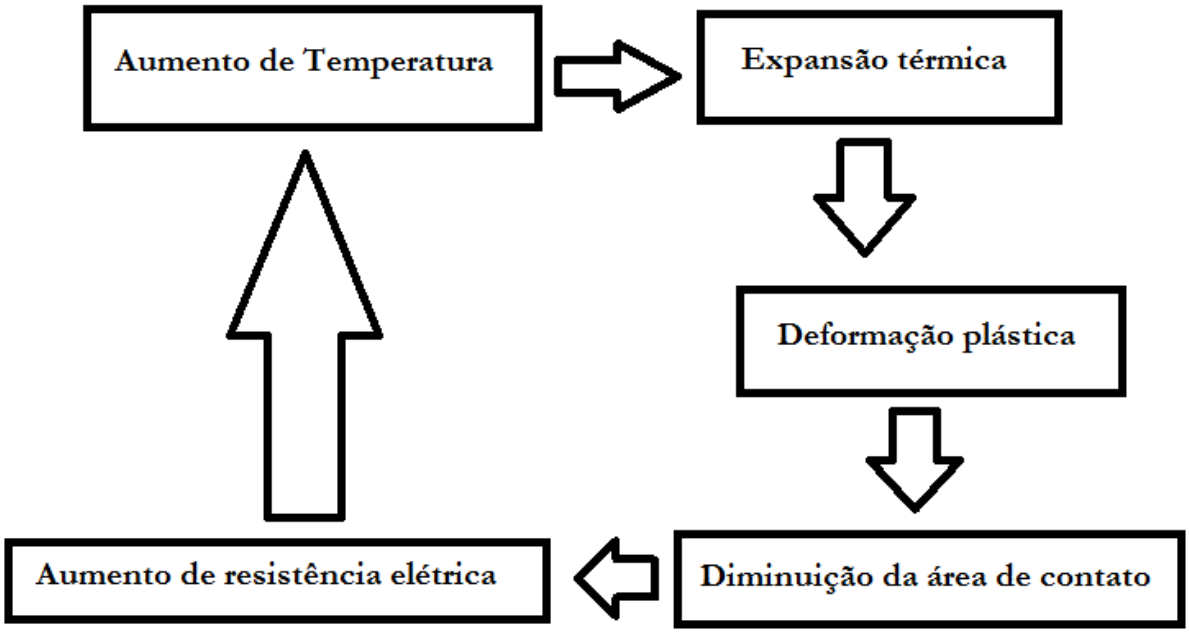
O ensaio consiste na aplicação de vários ciclos-térmicos de envelhecimento, aplicação de curtos-circuitos, e novamente a aplicação de mais uma série de ciclos térmicos. A primeira série consiste de 200 ciclos-térmicos, a segunda de 500 ciclos e quatro curtos-circuitos que devem ser aplicados entre as duas séries. Esse aquecimento e resfriamento dos conectores realizado por diversas vezes tem como objetivo causar um estresse térmico/mecânico e verificar como ele reage a tais situações. Os conectores ao serem instalados em uma rede de distribuição sofrerão aquecimento e resfriamento, dependendo da carga elétrica que está sendo solicitada, possuindo alta corrente em horários de picos e por conseqüência, maior temperatura, e resfriamento quando houver algum desligamento daquela seção da rede em horários de menor demanda. Desta maneira, esse teste visa simular as condições reais a que um conector é submetido na prática, só que dentro de um laboratório, onde é possível observar, medir e acompanhar a maneira como o conector se comporta e posteriormente emitir um parecer se apresentou desempenho adequado ou não.

A elevação de temperatura é uma das maiores causas de deterioração em uma conexão. Na pior das hipóteses a conexão pode chegar a uma temperatura maior do que a temperatura de fusão do material da conexão. Se o processo de fusão não for interrompido, a solicitação mecânica aos quais os condutores estão sofrendo serão maiores do que a pressão que mantém a conexão unida, pois o material que faz a conexão em processo de fusão perde sua rigidez mecânica e finalmente o contato se desfaz. Caso o processo de fusão seja interrompido logo no início, quando o material sofrer resfriamento, ele irá retrair e assumirá uma superfície de contato com menos pontos de contato do que havia antes. Ainda que o material não chegue perto do seu ponto de fusão, os efeitos da elevação de temperatura continuam sendo nocivos para conexão, isso porque ele continua a sofrer expansão térmica. O contato é mantido por uma força de contato mecânica e ao aquecer, os materiais da conexão sofrem expansão térmica, essa força gerada pela expansão de um material contra o outro é de valor excessivo e

gera deformações plásticas no material. Ao se resfriar, o material se retrai, porém a deformação plástica continua e diminui a área de contato.

Desta forma, é possível afirmar que aumento de temperatura seguido de resfriamento gera diminuição de área de contato, que gera um aumento de resistência elétrica que gera aumento de dissipação térmica para um valor constante de corrente, o que gera aumento de temperatura e assim por diante. Ou seja, se trata de um efeito realimentado, dessa maneira, a cada ciclo térmico, maior é a deterioração da conexão. A Figura 19 apresenta o ciclo de deterioração da conexão por aumento de temperatura.

Figura 19 – Deterioração de conexão por elevação de temperatura



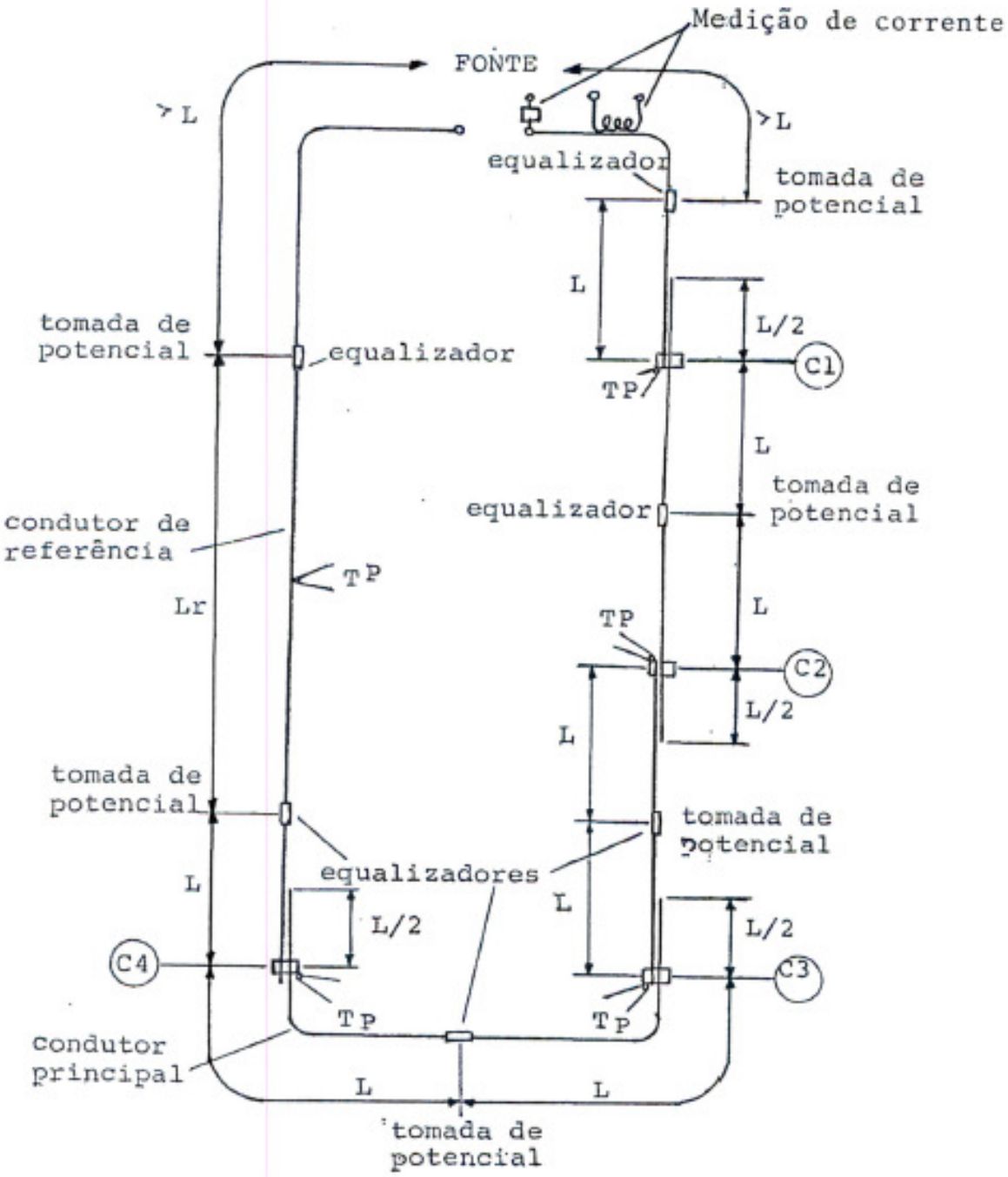
Fonte: O AUTOR

3.1.1. Circuito de ensaio

Para realização dos ensaios, algumas questões devem ser observadas conforme NBR9326, no local onde serão realizados os ensaios não deve haver corrente de ar, não deve haver incidência direta de luz solar sobre as amostras ou possuir fonte de calor em suas proximidades, temperatura ambiente deve ser ente 15ºC e 35°C, não deve haver incidência de contaminantes de ar, como vapores corrosivos ou compostos químicos, que possam atacar os metais por qualquer efeito. O circuito de ensaio deve obedecer algumas distâncias mínimas, entre dois condutores paralelos deve haver pelo menos uma distância de 20cm, entre qualquer condutor e qualquer parede vertical do local de ensaio essa distância mínima deve ser de

30cm e entre dois circuitos de ensaio e entre um circuito de ensaio e piso ou o teto do local deve ser de pelo menos 60cm. Os quatro conectores utilizados no circuito de ensaio devem ser idênticos. O circuito de ensaio deve ser montado conforme a Figura 20.

Figura 20 – Circuito de ensaio



Fonte: NBR9326

C1, C2, C3 e C4 são os conectores que estão sendo submetidos aos ensaios. Os pontos de tomada de potencial são os locais que devem ser utilizados para medir a tensão elétrica das conexões. Quando os condutores, sobre os quais estão montados os conectores, forem encordoados, dois equalizadores eqüidistantes dos conectores devem ser montados sobre os condutores. Estes são destinados a assegurar um contato íntimo e permanente com todos os fios que compõem o condutor e facilitar a instalação de tomadas de potencial, necessárias às medições de resistência [8]. Os equalizadores podem ser formados por uma luva de compressão de mesmo material que o condutor, ter um diâmetro interno que exceda no máximo de 1mm o diâmetro do condutor e ter um comprimento igual ou inferior ao diâmetro do condutor. As tomadas de potencial devem ser localizadas no centro de cada equalizador podendo constituir-se de um ponto de solda ou de um parafuso rosqueado no equalizador, sem entretanto, ferir os fios que compõem o condutor. Quando o condutor for sólido, ou seja, não for composto por vários filamentos do condutor, não são necessários equalizadores, devendo as tomadas de potencial serem feitas sobre o próprio condutor, nos mesmos pontos em que seriam instalados os equalizadores [8].

Conforme NBR9326, o comprimento dos condutores, sobre os quais são montados os conectores sob ensaio, deve ser tal que a distância entre o centro dos conectores e cada uma das tomadas de potencial adjacentes seja igual ao valor L, indicado na Tabela 1.

Tabela 1 – Distância entre conectores e tomadas de potencial

Seção nominal do condutor S (mm^2)	Distância L (mm)
$S \leq 16$	125
$16 < S \leq 50$	200
$50 < S \leq 120$	300
$120 < S \leq 240$	400
$240 < S \leq 400$	500
$400 < S \leq 630$	650
$630 < S \leq 1.000$	750
$S > 1.000$	950

Fonte: NBR9326 [8]

Os condutores auxiliares, para ligação do circuito de ensaio à fonte de alimentação, devem ter, no mínimo, o comprimento L. O condutor de referência deve fazer parte do circuito de ensaio, em série com os conectores sob ensaio. O condutor de referência destina-se a controlar a corrente de aquecimento, comparar sua resistência elétrica com a resistência elétrica dos demais condutores contendo conectores e comparar sua temperatura com a temperatura dos conectores sob ensaio. O condutor de referência deve obedecer às exigências de estar em série no circuito de ensaio, situado entre dois equalizadores, do mesmo modo que os condutores que contêm conectores e ter as mesmas características que os condutores sobre os quais estão montados os conectores sob ensaio [8].

No circuito de ensaio deve ser aplicada uma corrente elétrica, de freqüência 60 Hz, de modo a aquecer os conectores sob ensaio e a manter estabilizada a temperatura do condutor de referência no valor e pelo tempo estabelecidos. A corrente de aquecimento deve ser regulada de modo a aquecer todo o circuito de ensaio e de tal modo que a temperatura, no ponto médio do comprimento do condutor de referência, se estabilize no valor especificado. O valor especificado consta na NBR5370, deve ser uma corrente que provoque no condutor de referência uma elevação de temperatura de 100±2ºC acima da temperatura ambiente, por exemplo, se a temperatura ambiente é de 25ºC, o circuito deve ser aquecido controlando a corrente que passa por ele até que a temperatura no condutor de referência chegue a 125ºC. A temperatura deve ser mantida estabilizada durante um período de 15 minutos. Para orientação prévia, a Tabela 2 indica valores aproximados das correntes de aquecimento requeridas, em função da seção nominal dos condutores, para se atingir aproximadamente 120ºC, sem correntes de ar e a 20ºC de temperatura ambiente [8].

Tabela 2 – Corrente de aquecimento requerida para temperatura de 120ºC

ALUMÍNIO		COBRE	
Seção nominal (mm^2)	Corrente (A)	Seção nominal (mm^2)	Corrente (A)
		10	106
16	102	16	157
25	139	25	200
35	175	35	253
50	225	50	323
70	283	70	407
95	350	95	500
120	412	120	590
150	480	150	687
185	545	185	795
240	670	240	950
300	780	300	1.110
400	950	400	1.350
500	1.110	500	1.670
630	1.300	630	1.840
800	1.550	800	2.170
1.000	1.800	1.000	2.520
1.300	2.160	1.300	3.000

Fonte: NBR9326 [8]

É interessante observar que a corrente de aquecimento para um condutor de cobre de mesma seção que um condutor de alumínio é de valor mais elevado. Uma corrente de 950 A provoca um aquecimento de 120ºC em condutor de cobre de seção 240mm², enquanto este mesmo valor de corrente provoca o mesmo aquecimento em um condutor de alumínio de 400mm² de seção.

Cada ciclo térmico é constituído por um período de aquecimento, seguido por um período de resfriamento. A tolerância durante os 15 minutos em que a temperatura é mantida estabilizada a 100ºC acima da ambiente é de ±2ºC. Após esse período a corrente é desligada e

se inicia o período de resfriamento. Ele deve ser prolongado até que a queda de temperatura do condutor de referência atinja no máximo 5ºC acima da temperatura ambiente.

É permitida a redução da duração do ciclo térmico por meio da aceleração da temperatura dos conectores, admitindo-se, no início do período de aquecimento, uma sobre-corrente igual, no máximo, a duas vezes a corrente de regime permanente. É permitido também reduzir o tempo de resfriamento por meio de ventilação forçada.

O conector é montado entre o condutor principal e o condutor de derivação, conforme a instrução de montagem do fabricante. O condutor principal deve ter um comprimento 1,5L para cada lado do equalizador, sendo o conector montado a uma distância L do mesmo equalizador. Desta forma, um comprimento 0,5L do condutor principal excede cada conector de derivação montado no circuito de ensaio. L deve ser tomado da tabela 1 em função da seção do condutor principal. O condutor de derivação deve ter um comprimento igual a L, medido entre o centro do conector e a tomada de potencial do equalizador. O condutor de referência deve ser idêntico ao condutor de derivação. Seu comprimento Lr deve ter o valor calculado pela equação 4 como segue [8]:

$$Lr = L \times \left(1 + \left(\frac{p}{p'}\right)\left(\frac{S'}{S}\right)\right) + 5d \tag{4}$$

Onde L é obtido conforme tabela 1 em mm; p é a resistividade do condutor principal em $\Omega.\mathrm{m}$; p' é a resistividade do condutor de derivação em $\Omega.\mathrm{m}$; S' é a seção do condutor de derivação em mm²; S é a seção do condutor principal em mm^2; d é o diâmetro do condutor de referência.

4. ESTUDO DE CASO

Como já mencionado anteriormente, deseja-se realizar os ciclos térmicos no conector utilizado para conectar o condutor que está ligado na saída do transformador rebaixador e a rede multiplexada de BT, a Figura 2 apresenta a conexão em questão. Uma grande parte dos transformadores utilizados na rede de distribuição secundária é de 75kVA.

Conforme NTD-00.001 [9], o condutor utilizado na saída do borne do transformador no lado da BT é de cobre isolado. No caso de 75kVA e 220/127V a bitola do condutor deve ser de 95mm² como é possível observar na Tabela 3.

Tabela 3 – Condutores de saída do transformador à rede secundária

Transformador (kVA)	220/127 V	380/220 V
30	25 mm²	
45	35 mm²	
75	95 mm²	35 mm²
112,5	150 mm²	95 mm²
150	2 x 95 mm²	120 mm²

Fonte: NTD-00.001 [9]

Como é possível observar no item 4.2.10.1 da NTD-00-001, no projeto de redes secundárias novas ou reformas deve ser utilizado condutor de alumínio multiplexado com isolamento tipo XLPE 0,6-1,0 kV: “Nos projetos de redes primárias novas e reformas deve ser previsto o emprego de condutores de alumínio cobertura XLPE 15 ou 25 kV fixados em espaçadores; o emprego de condutores nus de alumínio (CA) dependerá de liberação do setor de planejamento da CEEE-D. Nos projetos de redes secundárias novas ou reformas deve ser previsto o emprego de condutores de alumínio multiplexado com isolamento tipo XLPE, 0,6-1,0 kV; o emprego dos condutores nu de alumínio (CA) fica restrito a complementação de fases, extensões de pequeno porte derivados de redes convencionais, ou quando forem determinado pelo setor de Planejamento da CEEE-D.”[9].

A bitola do condutor dependerá da potência do transformador, para o caso de 75 kVA, a bitola é de 70mm² como é possível observar no item 4.2.10.5 da NTD-00.001: “As seções dos condutores nas saídas de transformadores devem ser reforçadas. Este reforço deve obedecer

ao que prescreve o item 4.2.5, mesmo que a queda de tensão não o exija." [9]. A utilização dos condutores deve atender ao prescrito na Tabela 4.

Tabela 4 – Condutor tronco de circuitos secundários

Transformador (kVA)	220/127 V			380/220 V		
	CA (AWG)	Mult. (mm²)	CC (AWG)	CA (AWG)	Mult. (mm²)	CC (AWG)
Até 75	1/0	70	2	2	50	4
112,5	4/0	120	2/0	1/0	70	2
150	4/0	120 ou (*)	2/0	1/0	95	1/0

Fonte: NTD-00.001 [9]

A Figura 20 apresenta o circuito de ensaio, e de acordo com o item 5.7.2.1 da NBR9326 o condutor principal deve ter um comprimento total de $3L$. A distância entre dois conectores adjacentes é de $2L$. Cada condutor principal excede em $0{,}5L$ cada conector de derivação. "O condutor principal deve ter um comprimento $1{,}5L$ para cada lado do equalizador, sendo o conector montado a uma distância L do mesmo equalizador. Desta forma, um comprimento de $0{,}5L$ do condutor principal excede cada conector de derivação montado no circuito de ensaio." [8]. L deve ser tomado da Tabela 1, em função da seção do condutor principal. A bitola do condutor principal é de $70\ mm^2$, o que remete a uma distância L de 300 mm. Como mencionado anteriormente, o comprimento total do condutor principal é de $3L$, o que resulta em 90 cm. De acordo com o diagrama esquemático do circuito de ensaio serão necessárias duas seções do condutor principal.

Ainda observando o diagrama esquemático do circuito na Figura 20 e também de acordo com o ítem 5.7.2.2 da NBR9326 o condutor de derivação possui uma distância entre conector adjacente de 2 L, o que corresponde a 60 cm, porém de acordo com catálogo do fabricante, o condutor deve exceder o conector em cerca de 4 cm o que resulta em um comprimento total de:

$$4\ cm + {}^{Lconec}/_{2} + 60\ cm + {}^{Lconec}/_{2} + 4\ cm = 68\ cm + Lconec4$$

Onde Lconec é o comprimento do conector e possui o valor de 35 mm o que resulta em um comprimento total do condutor de derivação de 715 mm. O ítem 5.7.2.2 da NBR9326 afirma que: "O condutor de derivação deve ter um comprimento igual a L, medido entre o centro do conector e a tomada de potencial do equalizador"[8].

O condutor de referência deve ser idêntico ao condutor de derivação. Seu comprimento Lr deve ter o valor calculado de acordo com a equação 4. Aplicando a equação 4 para o caso em estudo, as variáveis envolvidas assumem os seguintes valores:

L de $300mm$ de acordo a tabela 1 para bitola de 70mm²;

S de $70mm^2$ que corresponde a seção do condutor principal;

p de $0{,}0278\Omega.\mathrm{mm}^2/\mathrm{m}$ que corresponde a resistividade elétrica do material do condutor principal que é de alumínio;

S' de $95mm^2$ que corresponde a seção do condutor de derivação;

p' de $0{,}0173\ \Omega.\mathrm{mm}^2/\mathrm{m}$ que corresponde a resistividade elétrica do material do condutor de derivação que é de cobre;

d de $11mm$ de corresponde ao diâmetro do condutor de referência.

Aplicando todos esses valores a equação 4 é obtido um valor para Lr de $1009mm$.

É possível observar pelo diagrama esquemático do circuito que o comprimento total do condutor que terá o trecho de referência é composto por $L + Lr + (> L)$. O valor de L é de $300mm$ e o valor de $(> L)$ será arbitrado em $500mm$. O tamanho total do condutor que possui o trecho de referência será de:

$$L + Lr + (> L) = 300mm + 1009mm + 500mm = 1809mm.$$

O tamanho do condutor de derivação conectado a fonte é possível obter de acordo com o diagrama esquemático do circuito de ensaio da figura 20, ele possui tamanho de L+(>L). O que resulta em:

$$300mm + 500mm = 800mm.$$

Agora que se possui todos os valores dos comprimentos dos condutores calculados é possível elaborar uma tabela com os resultados. É possível observar na figura 20 que existem 5 segmentos de condutores, A Tabela 5 apresenta o tamanho total de cada segmento, acompanhando o circuito em sentido anti-horário a partir da fonte.

Tabela 5 – Tamanho dos condutores

Segmentos	Condutor	Tamanho Total
1	Cobre	1809mm
2	Alumínio	900mm
3	Cobre	715mm
4	Alumínio	900mm
5	Cobre	800mm

Fonte: O AUTOR

O circuito montado no laboratório está apresentado na Figura 21. Foram utilizados 6 termopares do tipo K, um em cada conector, um no condutor de referência e outro no condutor principal.

Figura 21- Circuito montado

Fonte: O AUTOR

Para alimentar o circuito foi utilizado um transformador de corrente com capacidade de 600 A. Os cones mantém o circuito a umacerta altura longe do chão. Um tapete de borracha isola eletricamente o transformador de corrente do chão. Os termopares foram colocados no centro do circuito para melhor observação das medidas de temperaturas. Os 4 conectores idênticos estão em série e conectam condutor de cobre e alumínio, os comprimentos estão de acordo com o calculado anteriormente.

Na Figura 22 é possível observar um dos conectores do circuito instalado. É interessante observar que o condutor principal, o da esquerda, vai além da conexão em $0{,}5L$ conforme orienta a norma, o que equivale a $15\ cm$. É interessante observar também que o capuz é responsável pela isolação da extremidade do condutor de derivação, sustentando a idéia de que o conector perfurante é aplicado em redes isoladas. O cabo branco de pequena bitola faz parte do termopar, ele foi instalado no conector próximo a região do condutor de alumínio que é onde o conector esquenta mais.

Figura 22 – Conector do circuito instalado

Fonte: O AUTOR

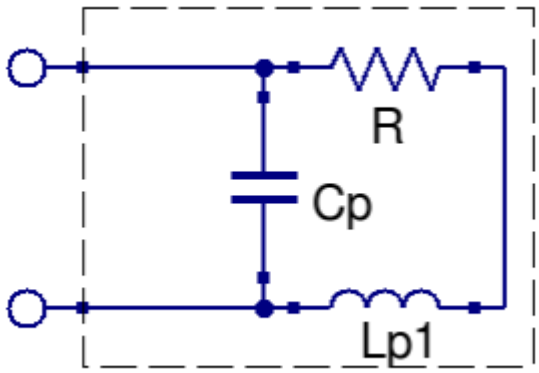
5. MODELOS TEÓRICOS

Para auxiliar na análise dos resultados e no comportamento do circuito é interessante que se construa modelos teóricos matemáticos que tenham a intenção de descrever o que ocorre na realidade. Para esta aplicação é interessante analisar o circuito de ensaio tanto do ponto de vista elétrico como do ponto de vista térmico.

5.1. MODELO ELÉTRICO

É sabido que para um condutor destinado a passagem de corrente elétrica existem valores de resistência elétrica, capacitância e indutância associados. Um modelo elétrico que engloba essas variáveis pode ser observado de acordo com a Figura 23.

Figura 23 – Modelo elétrico



Fonte: Integridade de sinais elétricos [10]

Sabe-se que cada elemento deste modelo possui uma impedância associada. O valor da reatância capacitiva relacionado ao elemento capacitivo do circuito pode ser calculado de acordo com a equação 5:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \tag{5}$$

Onde f representa a freqüência de operação do circuito em hertz e C a capacitância em Farads. A reatância X_c é medida em ohms.

A equação 6 fornece o valor para reatância indutiva relacionada ao elemento indutivo do modelo elétrico.

$$X_L = 2\,\pi f \mathrm{L} \tag{6}$$

Onde f representa a freqüência de operação do circuito em hertz e L a indutância em henrys. A reatância X_L é medida em ohms.

Apesar que a indutância e a capacitância de um cabo sejam de valores bem reduzidos, a alta freqüência pode representar um valor não desprezível. Porém na aplicação a qual se está operando o circuito elétrico a frequência é baixa, de 60 Hz. Pela equação 5 é possível observar que a reatância capacitiva tende a infinito para baixos valores de frequência e capacitância e que a reatância indutiva tende a zero para baixos valores de indutância e frequência. Desta maneira, para esta aplicação, o capacitor em paralelo se comporta como circuito aberto, impedância infinita e a indutância série se comporta como curto-circuito, impedância zero. Como a resistência é muito maior do que a capacitância e a indutância além da frequência de 60 Hz ser considerada baixa, o circuito pode ser simplificado e aproximado apenas pela sua resistência. A equação 7 fornece a maneira de calcular a resistência elétrica em um cabo.

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{7}$$

Onde ρ é a resistividade do material em [Ω.m] ; l é o comprimento do condutor em [m] e A a seção transversal do condutor em [m²].

A norma brasileira NBR5370 define que é considerado um trecho de conexão aquele que é situado entre dois equalizadores adjacentes do circuito de ensaio. Pela Figura 20 é possível verificar que o trecho de conexão que corresponde ao conector C4 por exemplo, possui uma distância L do condutor de cobre, engloba o conector C4 e depois mais uma distância L do condutor de alumínio. O conector é formado internamente por 4 hastes metálicas dentadas que fazem a conexão elétrica. São duas hastes em paralelo na porção superior e duas hastes em paralelo na porção inferior do conector. Na Figura 24 é possível observar estas hastes acomodadas no conector desmontado. Nota-se que elas estão envoltas por uma espécie de pasta na cor branca responsável pela estanqueidade. Na esquerda observa-se a porção superior do conector e na direita a porção inferior. A distância entre as hastes é de 18mm.

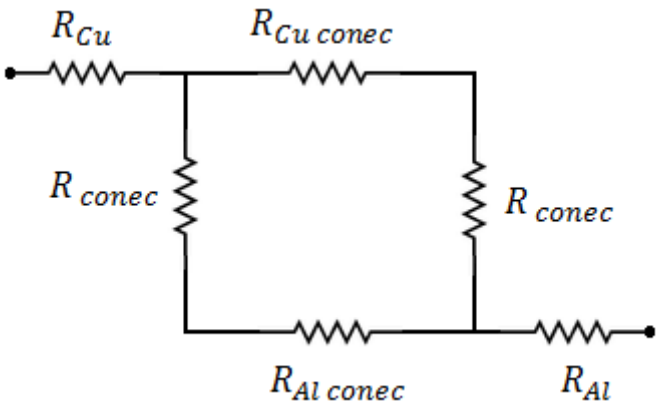
Figura 24 – Visão interna do conector

Fonte: O AUTOR

O comprimento do condutor que vai do equalizador até o centro do conector é L. É necessário que some a metade da distância entre as hastes do conector para que se possua a distância entre o equalizador até o último ponto de contato do conector, resultando em $L + 9mm$ que é igual a $309mm$. O comprimento do segmento do condutor que vai do equalizador até o primeiro ponto de contato elétrico do conector é de $291mm$ e até o segundo ponto de contato elétrico é de $309mm$.

O circuito equivalente ao trecho de conexão pode ser observado pela Figura 25 que contém o diagrama elétrico.

Figura 25 – Modelo elétrico do trecho de conexão



Fonte: O AUTOR

R_{Cu} corresponde a resistência do condutor de cobre do trecho que vai do equalizador até o primeiro ponto de contato com as hastes do conector;

$R_{Cu\ conec}$ corresponde a resistência do condutor de cobre do trecho entre os pontos de contato das hastes do conector;

$R_{Al\ conec}$ corresponde a resistência do condutor de alumínio do trecho entre os pontos de contato das hastes do conector;

R_{Al} corresponde a resistência do condutor de alumínio do trecho que vai do último ponto de contato com as hastes do conector até o próximo equalizador;

R_{conec} corresponde a resistência da haste do conector.

A resistência elétrica dos condutores é calculada de acordo com a equação 7. O comprimento l para R_{Cu} e R_{Al} é de 291mm. Sabendo-se que a resistividade do condutor de cobre é de 0,0173 Ω.mm²/m e a sua área de seção transversal é de 95mm² e que estes mesmos valores para o condutor de alumínio é de 0,0278 Ω.mm²/m e 70mm² resulta em R_{Cu} de 52,99 μΩ e R_{Al} de 115,57 μΩ . Observa-se que R_{Al} possui valor maior do que o dobro de R_{Cu}. Com estas mesmas informações e sabendo que o l de $R_{Cu\ conec}$ e $R_{Al\ conec}$ corresponde a 18mm que é a distância entre as hastes metálicas do conector obtém-se o valor de $R_{Cu\ conec}$ = 3,28 μΩ e $R_{Al\ conec}$ = 7,15 μΩ.

A resistência do trecho de conexão pode ser definida de acordo com o circuito da Figura 25 conforme a equação 8:

$$R_{total} = R_{Cu} + (R_{Cu\ conec} + R_{conec})//(R_{Al\ conec} + R_{conec}) + R_{Al} \qquad (8)$$

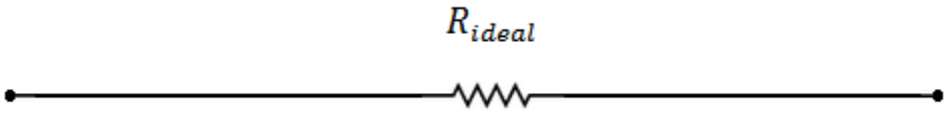
Realizando os cálculos chega-se na equação 9 e posteriormente a 10:

$$R_{total} = R_{Cu} + R_{Al} + \frac{(R_{Cu\,conec}+R_{conec})\times(R_{Al\,conec}+R_{conec})}{(R_{Cu\,conec}+R_{conec})+(R_{Al\,conec}+R_{conec})} \quad (9)$$

$$R_{total} = R_{Cu} + R_{Al} + \frac{R_{Cu\,conec}R_{Al\,conec}+R_{Cu\,conec}R_{conec}+R_{conec}R_{Al\,conec}+R_{conec}{}^{2}}{R_{Cu\,conec}+R_{Al\,conec}+2R_{conec}} \quad (10)$$

A NBR5370 define que a resistência de um trecho com conexão deve ser menor do que a resistência de um trecho sem conexão. Para isso é possível imaginar idealmente como seria esse trecho sem conexão, o modelo elétrico obedeceria o que está disposto na Figura 26.

Figura 26 – Trecho de conexão ideal



Fonte: O AUTOR

Um trecho sem conexão possui o mesmo comprimento do trecho com conexão e os mesmos condutores. O tamanho deste trecho é $2L$. Metade do trecho possui comprimento L e equivale ao condutor de cobre, e a outra metade de comprimento L equivale ao condutor de alumínio. Um condutor de cobre de comprimento L pode ser descrito como uma resistência de valor $R_{Cu} + \frac{R_{Cu\,conec}}{2}$. Um condutor de alumínio de comprimento L pode a ser descrito como uma resistência de valor $R_{Al} + \frac{R_{Al\,conec}}{2}$. As resistências foram descritas nos mesmos termos das resistências envolvidas no trecho com conexão para que possa haver uma comparação entre elas. As variáveis R_{Cu} e R_{Al} representam a resistência do comprimento dos condutores que excede a conexão e as variáveis $\frac{R_{Cu\,conec}}{2}$ e $\frac{R_{Al\,conec}}{2}$ representam a resistência do comprimento dos condutores dentro da conexão, metade de cobre e a outra metade de alumínio, por isso a divisão por 2.

A Resistência equivalente fica conforme a equação 11:

$$R_{ideal} = R_{Cu} + \frac{R_{Cu\,conec}}{2} + \frac{R_{Al\,conec}}{2} + R_{Al} \quad (11)$$

A metade do trecho que é de cobre possui resistência $R_{Cu} + \frac{R_{Cu\,conec}}{2}$ que possui um comprimento de $291mm + 9mm$ que equivale a $300mm$. Esse é o mesmo tamanho do trecho de cobre de resistência $\frac{R_{Al\,conec}}{2} + R_{Al}$. Somando-se os dois trechos obtém-se um comprimento total de $600mm$, ou seja, $2L$. Este é o mesmo comprimento do trecho com a conexão, sendo coerente desta maneira, fazer a comparação entre o trecho com o conector e o

trecho ideal sem o conector. O trecho sem o conector é formado por um condutor de dois materiais diferentes, metade de cobre, e outra metade de alumínio.

A R_{total} da equação 10 tem que ser menor do que a da equação 11 pela exigência da norma, o que resulta na equação 12 e posteriormente a 13:

$$2\frac{R_{Cu\ conec}R_{Al\ conec}+R_{Cu\ conec}R_{conec}+R_{conec}R_{Al\ conec}+R_{conec}^{2}}{R_{Cu\ conec}+R_{Al\ conec}+2R_{conec}} < R_{Cu\ conec}+R_{Al\ conec} \quad (12)$$

$$2R_{Cu\ conec}R_{Al\ conec}+2R_{Cu\ conec}R_{conec}+2R_{conec}R_{Al\ conec}+2R_{conec}^{2} < R_{Cu\ conec}^{2}+2R_{Cu\ conec}R_{Al\ conec}+R_{Al\ conec}^{2}+2R_{conec}R_{Cu\ conec}+2R_{conec}R_{Al\ conec} \quad (13)$$

A equação 13 se reduz a equação 14 que resulta na equação 15:

$$2R_{conec}^{2} < R_{Cu\ conec}^{2}+R_{Al\ conec}^{2} \quad (14)$$

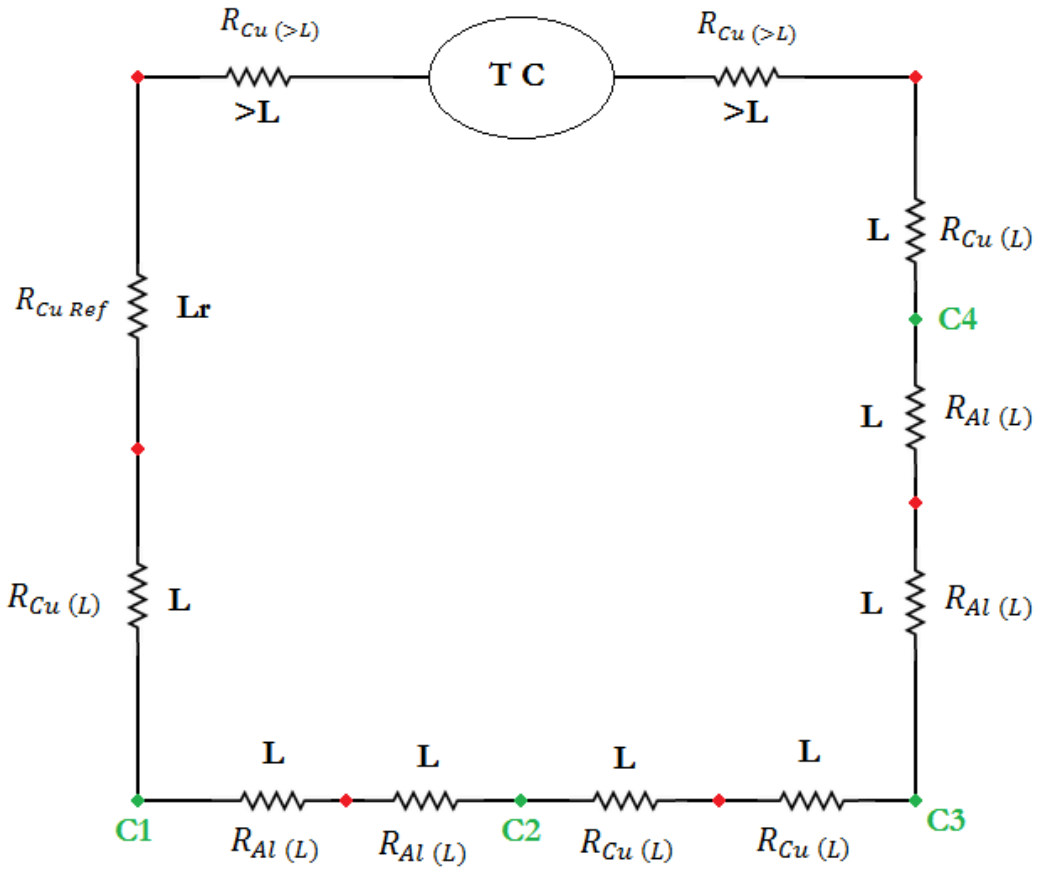
$$R_{conec} < \sqrt{\frac{R_{Cu\ conec}^{2}+R_{Al\ conec}^{2}}{2}} \quad (15)$$

Substituindo os valores na equação 15 resulta-se em $R_{conec} < 5{,}56\ \mu\Omega$.

A utilização do conector não deve acrescentar resistência elétrica ao circuito. O segredo está no projeto do conector, ele sempre coloca os dois condutores em paralelo na região da conexão. Quanto maior a distância entre as hastes, menor é a resistência elétrica do trecho de conexão, pois um trecho maior entre os condutores está sendo colocado em paralelo.

Desprezando o fato de que o conector gera uma leve queda no valor da resistência do trecho de conexão é possível aproximar o modelo do circuito completo pelo disposto na Figura 27.

Figura 27 – Modelo elétrico do circuito de ensaio



Fonte: O AUTOR

TC representa o Transformador de corrente que alimenta o circuito. Já conhecidos os valores da área transversal, resistividade e comprimento de cada trecho é possível calcular cada uma das resistências de acordo com a equação 7. Lembrando-se que $(> L) = 500mm$; $Lr = 1009mm$ e $L = 300mm$ obtém-se os seguintes valores de resistências:

$R_{Cu\ (>L)}$ = 91,05 μΩ

$R_{Cu\ Ref}$ = 183,74 μΩ

$R_{Cu\ (L)}$ = 54,63 μΩ

$R_{Al\ (L)}$ = 119,14 μΩ

Somando-se cada trecho do circuito obtém-se a resistência equivalente conforme a equação 16:

$$R_{equiv} = 2R_{Cu\ (>L)} + R_{Cu\ Ref} + 4R_{Cu\ (L)} + 4R_{Al\ (L)} \quad (16)$$

Fazendo a substituição dos valores obtém-se R_{equiv} = 1060,92 μΩ.

A resistência de um trecho de conexão que segundo a NBR 5370 é a resistência entre dois equalizadores adjacentes que englobam um conector que é a soma de $R_{Cu\ (L)}$ e $R_{Al\ (L)}$ que resulta em 173,77 μΩ.

5.2. MODELO TÉRMICO

As grandezas ligadas à eletrodinâmica são variáveis distribuídas as quais respeitam as equações de MAXWELL juntamente com as condições de contorno definidas pelo sistema. Estas variáveis que são parâmetros distribuídos podem ser integradas e se tornarem parâmetros concentrados. Os circuitos elétricos normalmente são analisados em termos de parâmetros concentrados. Da mesma forma, as equações que regem a termodinâmica também podem ser analisadas em termos de parâmetros concentrados e desta maneira um sistema térmico se torna semelhante a um circuito elétrico e se torna possível fazer uma analogia entre ambos. Esta analogia entre as grandezas térmicas e elétricas está descrita na Tabela 6.

Tabela 6 – Análogos elétricos de campos térmicos

Grandeza	Campo térmico	Análogo elétrico
Resistividade	$\rho_{térm}$(m.°C/W)	ρ (Ω.mm²/km)
Resistência	$R_{térm} = \rho_{térm}$.l/S(°C/W)	R= ρ.l/S(Ω)
Força de campo	Diferença de temperatura T (°C)	Diferença de potencial V (V)
Fluxo	Fluxo térmico W (W)	Corrente I (A)
Relação básica	T =W. $R_{térm}$	V=R.I

Fonte: Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica [1]

A resistência térmica é análoga a resistência elétrica e está associada à dificuldade de um corpo em transferir calor. A resistência térmica da capa protetora de material isolante que envolve um condutor cilíndrico pode ser calculada da seguinte maneira [1]:

$$R_{térm\ capa} = \frac{\rho_{térm}}{2\pi l} ln \frac{d_{iso}}{d_c} \tag{17}$$

A $R_{térm}$ é medida em [°C/W]; $\rho_{térm}$ representa a resistividade térmica da capa protetora em [m.°C/W]; l o comprimento do condutor em [m]; d_c é o diâmetro do condutor e d_{iso} é o diâmetro externo.

Existe transferência de calor do condutor para a capa por meio de condução e transferência de calor da capa para o ar por meio de convecção. A resistência térmica do meio é uma resistência de convecção pois o ar é um fluido. O ar que está em contato com a capa

esquenta e diminui sua densidade, dessa forma ele sobe e o ar mais denso entra em contato com a capa que também esquenta e diminui sua densidade e sobe. Assim este processo, que se chama de transferência de calor por convecção, segue continuamente.

A resistência térmica do meio pode ser calculada como segue [11]:

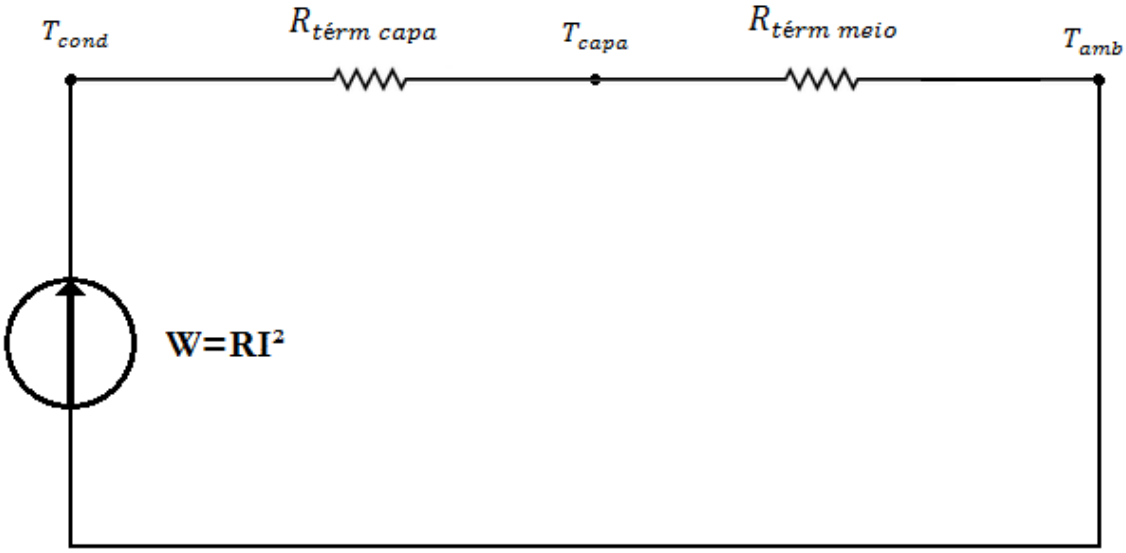
$$R_{térm\ meio} = \frac{1}{hA} \tag{18}$$

Onde h representa o coeficiente de convecção do meio em [W/m².°C] e A representa a área de contato com o fluido em [m²].

Sabe-se que toda a energia elétrica se transforma em energia térmica por efeito Joule, ou seja, a quantidade de calor produzida em um condutor de resistência R e corrente I em um intervalo de tempo t é $E = RI^2$ $[J]$. Em regime permanente térmico, quando as temperaturas estão constantes, significa que o fluxo de calor é constante e a taxa de transferência de calor por unidade de tempo é W= RI^2 $[W]$.

Tendo estas informações em mãos é possível criar um circuito térmico que representa um condutor cilíndrico de resistência elétrica R e corrente I, com capa isolante e imerso no ar análogo a um circuito elétrico como disposto na Figura 28.

Figura 28 – Modelo térmico



Fonte: O AUTOR

O fluxo de calor W é análogo a corrente elétrica, a temperatura é análoga a tensão elétrica e a resistência térmica é análoga a resistência elétrica. Desta maneira é possível obter as temperaturas das superfícies da capa e do condutor de acordo com as equações 19 e 20:

$$T_{capa} = T_{amb} + R_{térm\ meio}.W \tag{19}$$

$$T_{cond} = T_{capa} + R_{térm\ capa}.W \tag{20}$$

Na Figura 20, observa-se que existem cinco trechos por onde passa corrente elétrica, estes condutores estão em série possuindo a mesma corrente. Percorrendo o circuito em sentido anti-horário a partir do TC obtém-se os seguinte trechos:

1) TC-C1
2) C1-C2
3) C2-C3
4) C3-C4
5) C4-TC

TC se refere aos terminais do transformador de corrente que alimenta o circuito e C1, C2, C3 e C4 refere-se aos pontos de conexão. Os condutores 1, 3 e 5 são de cobre com isolação PVC e os condutores 2 e 4 são de alumínio com isolação XLPE. A resistência elétrica de cada condutor é calculada como segue:

1) $R_{Cu\ (>L)} + R_{Cu\ Ref} + R_{Cu\ (L)} = 329{,}42\ \mu\Omega$

2) $2R_{Al\ (L)} = 238{,}28\ \mu\Omega$

3) $2R_{Cu\ (L)} = 109{,}26\ \mu\Omega$

4) $2R_{Al\ (L)} = 238{,}28\ \mu\Omega$

5) $R_{Cu\ (L)} + R_{Cu\ (>L)} = 145{,}68\ \mu\Omega$

É possível calcular qual é a resistência térmica da capa de cada condutor através da equação 17. Será considerado um valor de 3,5 m°C/W para $\rho_{térm}$ e sabe-se que d_{iso} e d_c do condutor de cobre vale 100,8 mm e 95 mm respectivamente e que para o condutor de alumínio vale 73,6 mm e 70 mm respectivamente [5]. O comprimento l dos condutores de cobre 1, 3 e 5 possuem o valor de 1809mm, 600mm e 800mm respectivamente. Os condutores de alumínio 2 e 4 possuem o mesmo comprimento l no valor de 600mm. A seguir seguem os valores da resistência térmica da capa de cada condutor:

1) $0{,}01825\ °C/W$
2) $0{,}04655\ °C/W$

3) $0{,}05502\ °C/W$

4) $0{,}04655\ °C/W$

5) $0{,}04126\ °C/W$

A resistência térmica do meio depende da área de contato do condutor com o ar e vale $2\pi(d_{iso}/2).\ l$. A seguir a área de contato com o ar para cada condutor:

1) $0{,}5729m^2$

2) $0{,}1387m^2$

3) $0{,}1900m^2$

4) $0{,}1387m^2$

5) $0{,}2533m^2$

Considerando um coeficiente de convecção h relacionado ao ar parado de 6,23 W/m².°C [12] e aplicando-se a equação 18 obtém-se os seguintes valores da resistência térmica do meio associada a cada condutor:

1) $0{,}2802\ °C/W$

2) $1{,}1573\ °C/W$

3) $0{,}8448\ °C/W$

4) $1{,}1573\ °C/W$

5) $0{,}6337\ °C/W$

A temperatura máxima em regime permanente a que pode chegar a isolação feita de XLPE do condutor de alumínio é de 90° segundo a NBR8182 [13]. O cálculo da temperatura na capa de isolação pode ser feito com a equação 19, e substituindo-se W por RI^2 obtém-se a seguinte equação:

$$T_{capa} = T_{amb} + R_{térm\ meio}.RI^2 \tag{21}$$

Isolando-se I obtém-se:

$$I = \sqrt{\frac{T_{capa} - T_{amb}}{R_{térm\ meio}.R}} \tag{22}$$

Desta maneira é possível calcular a corrente máxima que suporta o condutor de alumínio com base na temperatura máxima suportada pela isolação em regime permanente. $R_{térm\ meio}$ e R já foram calculados anteriormente: 1,1573 °C/W e 238,28 μΩ respectivamente para o condutor de alumínio, considerando-se uma T_{amb} de 24°C e T_{capa} de 90°C obtém-se I = 489,22 A. Aplicando-se essa corrente ao circuito é possível obter a temperatura da capa de isolação do condutor de cobre de acordo com a equação 21. A temperatura obtida é de 46,09°C para todos os condutores de cobre. Os valores de temperatura não dependem do

comprimento do condutor. Este valor também está dentro daquele definido pela NBR7288 [14] como sendo a temperatura máxima em regime permanente para cabos de isolação em PVC que é de 70°C. Caso a temperatura no condutor de cobre superasse os 70ºC teria que se calcular uma corrente pela equação 22 considerando os parâmetros do condutor de cobre e uma T_{capa} de 70ºC e essa seria a corrente de operação. Nenhum dos condutores pode operar em regime permanente acima da temperatura máxima permitida pela sua camada de isolação.

Conhecendo-se a T_{capa} é possível calcular a temperatura na superfície do diâmetro interno do condutor, que é a superfície do metal condutor. Substituindo-se $W=RI^2$ na equação 20 obtém-se:

$$T_{cond} = T_{capa} + R_{térm\ capa}.RI^2 \tag{23}$$

Considerando-se $R_{térm\ capa}$= 0,04655 °C/W, R = 238,28 μΩ, T_{capa} = 90°C e I = 489,22 A obtém-se uma temperatura no diâmetro interno do condutor de alumínio de 147,03°C. É possível, da mesma maneira, calcular a temperatura no diâmetro interno do condutor de cobre, obtém-se um valor de 47,53°C.

6. RESULTADOS

A norma NBR5370 define que sejam realizados 200 ciclos térmicos, 4 curtos-circuitos e novamente mais 500 ciclos térmicos. Por se tratar de um trabalho acadêmico onde deseja-se verificar o comportamento do conector e não para homologação do conector como faria um laboratório credenciado e também por restrição de tempo, foram realizados 50 ensaios.

A norma se aplica a conectores que não possuem camada de isolação, normalmente utilizados em redes nuas de distribuição e orienta que o condutor de referência seja aquecido a uma temperatura de 100°C acima da ambiente, porém este tipo de aquecimento causaria dano na isolação dos cabos utilizados se utilizada em regime permanente.

O condutor de cobre possui uma camada de isolação XLPE e a NBR7288 afirma que para este tipo de isolação a temperatura máxima em regime permanente é de 90°C. Para regime de sobrecarga a temperatura máxima é de 130°C. A operação em regime de sobrecarga não pode superar 100h durante 12 meses consecutivos, nem 500h durante a vida do cabo. O cabo, quando submetido a regime de sobrecarga, tem sua vida reduzida em certo grau, em ralação à vida prevista para as condições em regime permanente [13]. Para o condutor de cobre que possui isolação em PVC a temperatura em regime permanente não deve ultrapassar 70°C e em regime de sobrecarga não deve ultrapassar 100°C.

Para aplicar um estresse maior ao conector e verificar seu desempenho foram realizados ensaios sob regime de sobrecarga além dos ensaios sob regime permanente. Metade dos ensaios, 25, foram realizados sob regime permanente e a outra metade, os outros 25 ensaios, foram realizados sob o regime de sobrecarga. Os ensaios sob regime de sobrecarga foram ensaiados por último para que o estresse causado pela sobrecarga não mascarasse o ensaio em regime permanente que causa menos estresse ao conector.

6.1. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

A idéia inicial era trabalhar com uma câmera de termovisão para medir a temperatura, porém na prática ela demonstrou-se inadequada para esta aplicação. Vários fatores externos influenciam na medida como sombra, reflexão, superfícies com diferentes acabamentos, emissividade adotada, temperatura do ar, distância entre a câmera e o objeto e ângulo de observação [15].

A distância de cada ponto até a câmera era diferente, assim como o ângulo de observação. Como pode se observar na Figura 29 a câmera foi colocada em um lugar alto para que pudesse minimizar essas diferenças, porém não apresentou resultados satisfatórios.

Figura 29 – Posição da câmera de termovisão

Fonte: O AUTOR

O simples fato de mudar de lugar a câmera já altera a leitura de temperatura. A diferença de temperatura verificada quando a câmera estava a poucos centímetros e de quando estava em cima do tripé em cima da bancada era de cerca de 10°C. O que ocorre é que o medidor óptico faz uma integral da área da superfície que se está medindo, um *spot*, e com o aumento da distância de observação, aumenta a área integrada, pois a conicidade do feixe óptico é constante. Logo, distâncias de observação diferentes, medem valores de temperaturas diferentes porque a área integrada é diferente. Por esta razão optou-se por se adquirir termopares do tipo K e utilizar as imagens da câmera de termovisão como parâmetro qualitativo. A câmera utilizada é da marca Eletrophysics, modelo PV320T2 com faixa de medição de -20°C a 500°C, ou seja, um *span* de 520°C. Possui erro máximo de ±2°C ou 2% do fundo de escala, o que for maior.

O termopar é um sensor de contato e para esta aplicação apresenta um número de variáveis que alteram a leitura correta do equipamento muito menor do que a câmera de termovisão, apresentando maior confiabilidade. O modelo utilizado de termopar vem acoplado a um multímetro digital. É da marca Minipa, modelo ET-1110. O termopar é do tipo

k e possui uma faixa de medição de -20°C a +750°C, ou seja, um *span* de 770°C. Erro máximo de ±(1.0% da leitura + 3 dígitos LSB). Os termopares foram colocados um ao lado do outro como mostra na Figura 30. O ideal seria utilizar sensores do tipo Pt100 ao invés de termopares pois eles medem uma faixa menor de temperatura o que acarreta em um erro menor da medida. A resolução seria maior. Uma calibração, mesmo que relativa, dos termopares poderia ter sido feita para melhorar a qualidade da medida visto que os termopares em mesmas condições apresentam diferença de temperaturas de unidades de °C.

Figura 30 - Termopares

Fonte: O AUTOR

6.2. ENSAIO EM REGIME PERMANENTE

O circuito foi aquecido inicialmente com uma corrente de 600 A para abreviar o período de aquecimento. Quando a temperatura chegou a 90ºC no condutor de alumínio o valor da corrente foi reduzido para 330 A, pois se verificou na prática que este valor de corrente estabiliza a temperatura no condutor de alumínio nos 90°C. Este valor de corrente difere daquele calculado pela equação 22 que foi de 489,22 A. Essa diferença de quase 50% entre os valores se deve provavelmente ao fato de que o coeficiente de convecção utilizado nos cálculos é uma variável empírica e de difícil determinação. Apesar dessa diferença, o cálculo serviu como razoável estimativa. Essa corrente não é totalmente fixa, sendo necessário controlá-la, aumentando ou reduzindo levemente monitorando a temperatura do cabo para que se mantenha constante. Uma variação de até 2°C é permitido por norma, pela

dificuldade em se obter esse máximo de variação, foi assumido para este experimento uma variação de até 3°C. A temperatura no condutor principal, que é o de alumínio foi mantida constante nos 90°C com variação de até 3°C para mais ou para menos durante 15 minutos que é o tempo previsto em norma para o período de aquecimento. Após esse período a temperatura ambiente e a temperatura dos termopares foram registradas. A alimentação é desligada, e começa o período de aquecimento, foi utilizado um ventilador para aumentar o processo de convecção e reduzir o tempo de resfriamento. Com ventilação forçada, o sistema leva cerca de 15 minutos para que a temperatura no condutor principal atinja sobre-elevação em relação a temperatura ambiente de 5ºC. Após este período inicia-se um novo período de aquecimento, e assim por diante. Os resultados estão apresentados na Tabela 7.

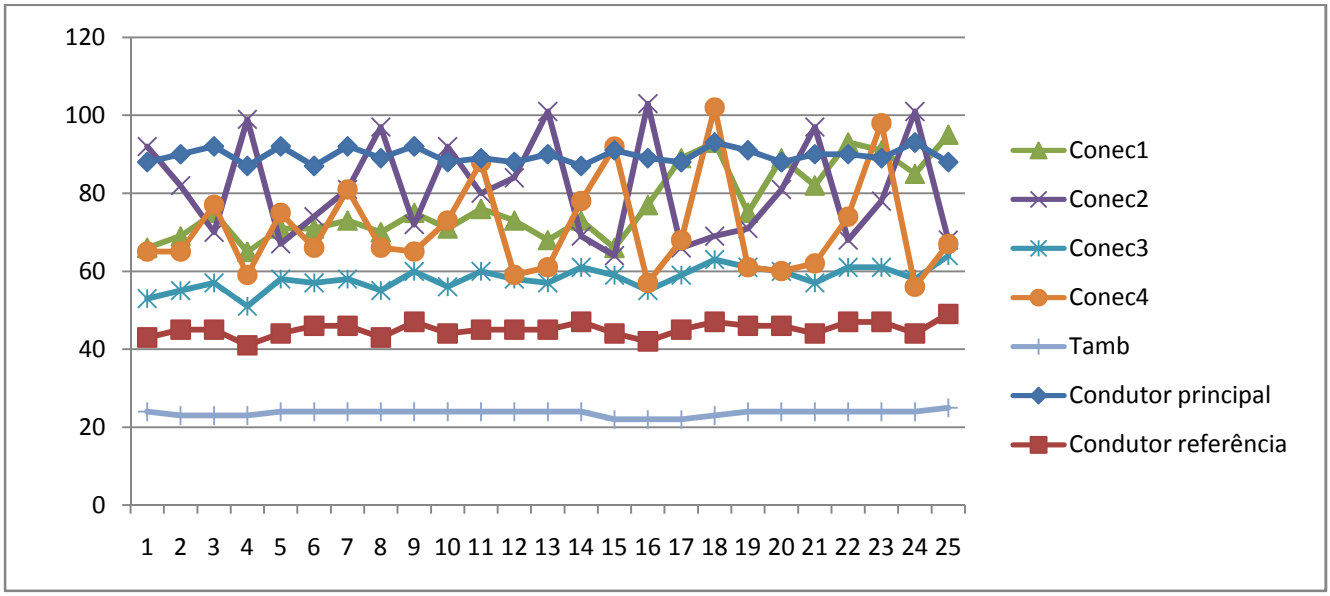
Tabela 7 – Medidas da temperatura em regime permanente

Ensaio	Cond princ	Cond Ref	C1	C2	C3	C4	Tamb
1	88	43	66	92	53	65	24
2	90	45	69	82	55	65	23
3	92	45	75	70	57	77	23
4	87	41	65	99	51	59	23
5	92	44	71	67	58	75	24
6	87	46	71	74	57	66	24
7	92	46	73	81	58	81	24
8	89	43	70	97	55	66	24
9	92	47	75	72	60	65	24
10	88	44	71	92	56	73	24
11	89	45	76	80	60	88	24
12	88	45	73	84	58	59	24
13	90	45	68	101	57	61	24
14	87	47	73	69	61	78	24
15	91	44	66	64	59	92	22
16	89	42	77	103	55	57	22
17	88	45	89	66	59	68	22
18	93	47	93	69	63	102	23
19	91	46	75	71	61	61	24
20	88	46	89	81	60	60	24
21	90	44	82	97	57	62	24
22	90	47	93	68	61	74	24
23	89	47	91	78	61	98	24
24	93	44	85	101	58	56	24
25	88	49	95	68	64	67	25
Média	89,64	45,08	77,24	81,04	58,16	71	23,64
Desvio padrão	1,91	1,80	9,48	13,02	3,02	12,79	0,76

Fonte: O AUTOR

Na Figura 31 é possível observar o gráfico de temperaturas em cada ensaio

Figura 31 – Gráfico de temperaturas em regime permanente



Fonte: O AUTOR

A norma orienta que a sobre-elevação de temperatura deve ser em relação a temperatura ambiente e deve ser mantida constante em 30°C no condutor de referência, porém nos ensaios que foram realizados o que foi controlado foi a temperatura no condutor principal de 90ºC por causa da limitação da isolação. Dessa maneira os dados não serão analisados em relação a temperatura ambiente e sim em relação a temperatura do condutor de referência.

A temperatura ambiente se manteve quase constante ao longo dos ensaios mantendo uma média de 23,64°C e desvio padrão inferior a 1°C. O condutor principal deveria ser mantido a uma temperatura constante de 90°C com variação máxima de 2°C. O ensaio apresentou um bom resultado com temperatura no condutor principal de 89,64 e desvio padrão inferior a 2°C. O condutor de referência apresentou uma temperatura média de 45,08°C com desvio padrão inferior a 2°C. A temperatura nos condutores obteve baixa dispersão como era de se esperar, diferente dos conectores. Referente aos valores de temperaturas, o modelo teórico apresentou um resultado muito semelhante ao encontrado na prática. Pelo modelo, a temperatura no condutor de referência deveria ser de 46,09°C para quando o condutor principal estivesse em 90°C. Na prática a temperatura medida foi de 45,08°C como já mencionado anteriormente. Pode-se dizer que não há diferença significativa entre os valores real e calculado pois ela é tão pequena que está dentro da faixa de incerteza do termopar.

Segue tabela 8 com as sobre-elevações de temperatura em relação ao condutor de referência.

Tabela 8 – Sobre-elevações de temperatura em regime permanente

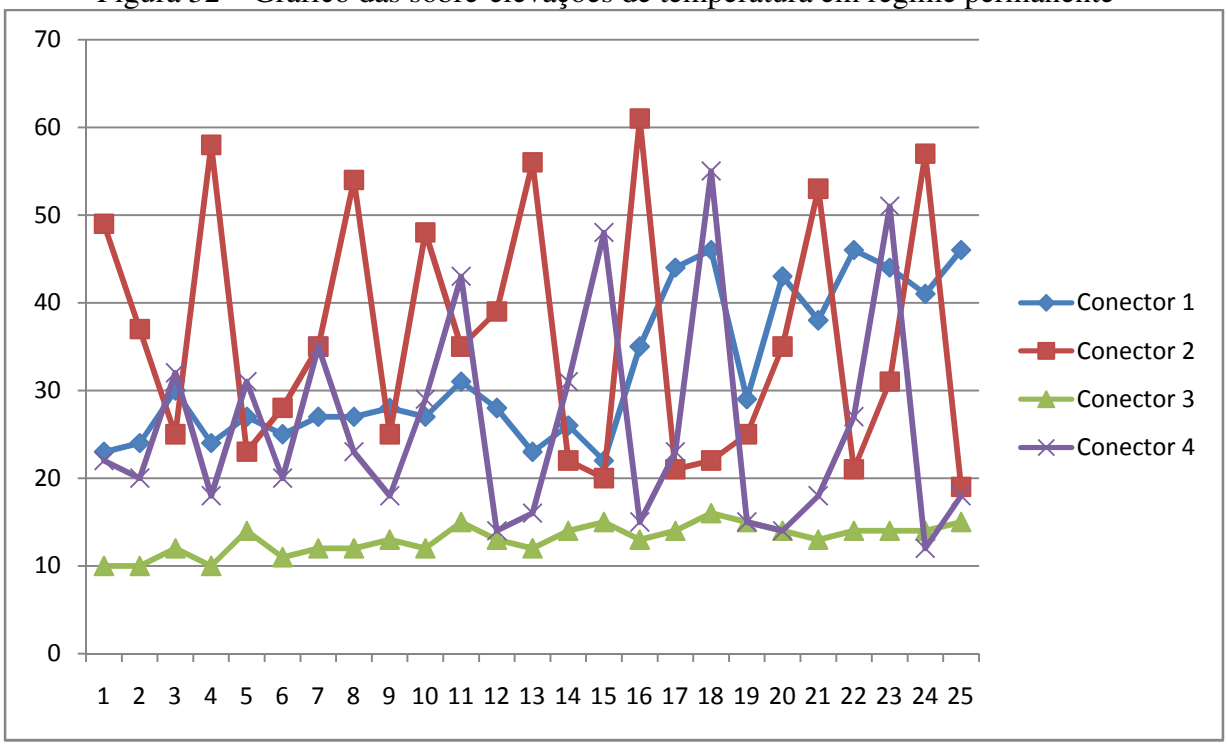
Ensaio	C1	C2	C3	C4	Tamb
1	23	49	10	22	24
2	24	37	10	20	23
3	30	25	12	32	23
4	24	58	10	18	23
5	27	23	14	31	24
6	25	28	11	20	24
7	27	35	12	35	24
8	27	54	12	23	24
9	28	25	13	18	24
10	27	48	12	29	24
11	31	35	15	43	24
12	28	39	13	14	24
13	23	56	12	16	24
14	26	22	14	31	24
15	22	20	15	48	22
16	35	61	13	15	22
17	44	21	14	23	22
18	46	22	16	55	23
19	29	25	15	15	24
20	43	35	14	14	24
21	38	53	13	18	24
22	46	21	14	27	24
23	44	31	14	51	24
24	41	57	14	12	24
25	46	19	15	18	25
Média	32,16	35,96	13,08	25,92	23,64
Desvio padrão	8,52	14,28	1,68	12,25	0,76

Fonte: O AUTOR

Os conectores 1 e 4 nos primeiros ensaios apresentavam pouca instabilidade e a medida que a quantidade de ensaios foi aumentando, a amplitude da variação dos valores foi se tornando cada vez maior. Isso ocorre porque a cada ensaio, o estresse gerado no conector deteriora cada vez mais a conexão. O conector 2 apresentou alta instabilidade desde os primeiros ensaios, isto indica que a conexão já era de má qualidade antes mesmo de aplicar o estresse térmico. Os conectores 1, 2 e 4 apresentaram desvio padrão elevado na sobrelevação de temperatura de 8,52°C, 14,28°C e 12,25°C respectivamente. O conector 3 por sua vez, apresentou

uma conexão de qualidade com desvio padrão baixo de 1,68°C. Segue na Figura 32 o gráfico das sobre-elevações de temperatura em regime permanente.

Figura 32 – Gráfico das sobre-elevações de temperatura em regime permanente



Fonte: O AUTOR

A cada ciclo os conectores sofreram dilatações e contrações devido a expansão térmica. No momento em que ocorre a dilatação os integrantes da conexão não tem para onde expandir se não um contra o outro devido a pressão constante que o corpo do conector causa neles pressionado pelo parafuso. Essa força de expansão de um material contra o outro é de valor elevado e causa deformações plásticas nos materiais da conexão. A deformação plástica muda a forma da interface entre os materiais e diminui a área de contato entre eles. A cada período de aquecimento o material volta a expandir e a área de contato aumenta, porém como houve deformação plástica, a cada ciclo essa área de contato vai variar, em determinados momentos a área de contato é maior e em outras a área de contato é menor, isso varia de forma desordenada. Por isso cada ciclo apresenta uma sobrelevação de temperatura diferente.

Cada vez que a temperatura aumenta a resistência também aumenta porque a área de contato diminui por conta das deformações plásticas. E cada vez que a resistência aumenta, a temperatura também aumenta e assim por diante. Por isso que foi possível observar que a cada ciclo a amplitude das sobrelevações de temperatura foi se tornando cada vez maior até chegar no limite.

6.3.ENSAIO EM REGIME DE SOBRECARGA

Em regime de sobrecarga, a temperatura máxima a que pode chegar a isolação do condutor de alumínio é de 130ºC e de 100º C para o condutor de cobre. Os ciclos foram feitos exatamente como no de regime permanente. A única diferença é que a temperatura no condutor principal foi elevada até 130ºC. A corrente necessária para isso ficou em cerca de 390 A. Na Tabela 9 é possível observar o resultado para esses ensaios.

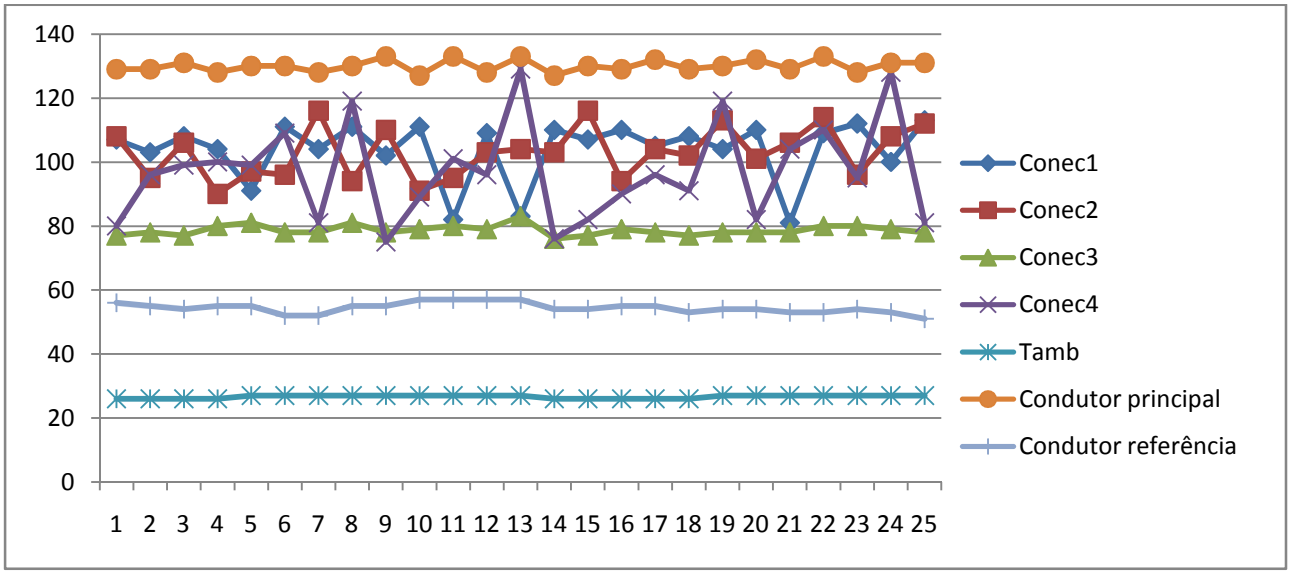
Tabela 9 - Medidas da temperatura em regime de sobrecarga

Ensaio	Cond princ	Cond Ref	C1	C2	C3	C4	Tamb
1	129	56	107	108	77	80	26
2	129	55	103	95	78	96	26
3	131	54	108	106	77	99	26
4	128	55	104	90	80	100	26
5	130	55	91	97	81	99	27
6	130	52	111	96	78	109	27
7	128	52	104	116	78	81	27
8	130	55	111	94	81	119	27
9	133	55	102	110	78	75	27
10	127	57	111	91	79	89	27
11	133	57	82	95	80	101	27
12	128	57	109	103	79	96	27
13	133	57	83	104	83	129	27
14	127	54	110	103	76	76	26
15	130	54	107	116	77	82	26
16	129	55	110	94	79	90	26
17	132	55	105	104	78	96	26
18	129	53	108	102	77	91	26
19	130	54	104	113	78	119	27
20	132	54	110	101	78	82	27
21	129	53	81	106	78	104	27
22	133	53	109	114	80	110	27
23	128	54	112	96	80	95	27
24	131	53	100	108	79	128	27
25	131	51	113	112	78	81	27
Média	130	54,4	103,8	102,96	78,68	97,08	26,64
Desvio padrão	1,89	1,63	9,45	7,91	1,57	15,38	0,49

Fonte: O AUTOR

Na Figura 33 é possível observar o gráfico de temperaturas em cada ensaio.

Figura 33 - Gráfico de temperaturas em regime de sobrecarga



Fonte: O AUTOR

Nos dias em que foram realizados os ensaios de sobrecarga a temperatura ambiente estava mais elevada. Apresentou um valor médio de 26,64°C. O condutor principal apresentou um aquecimento de média igual a 130°C como desejado e um desvio padrão inferior a 2°C. O condutor de referência apresentou uma temperatura muito inferior que o principal, com valor médio de 54,4°C e desvio padrão de 1,63°C. A diferença média entre os condutores foi de 75,5°C. Este valor elevado se dá pelo fato dos condutores serem de materiais diferentes e bitolas diferentes.

Segue a Tabela 10 com as sobre-elevações de temperatura em relação ao condutor de referência.

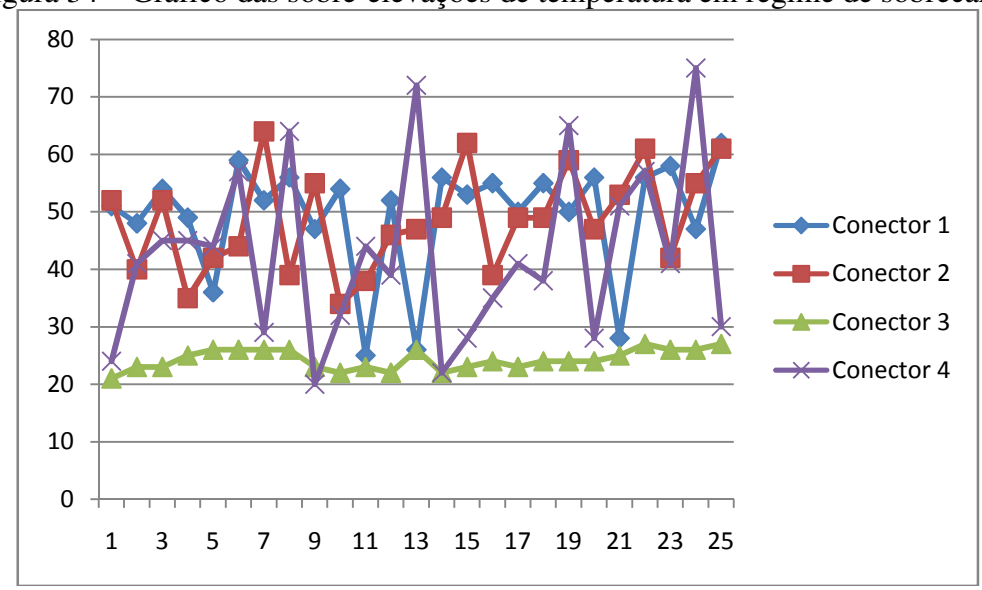
Tabela 10 - Sobre-elevações de temperatura em regime de sobrecarga

Ensaio	C1	C2	C3	C4
1	51	52	21	24
2	48	40	23	41
3	54	52	23	45
4	49	35	25	45
5	36	42	26	44
6	59	44	26	57
7	52	64	26	29
8	56	39	26	64
9	47	55	23	20
10	54	34	22	32
11	25	38	23	44
12	52	46	22	39
13	26	47	26	72
14	56	49	22	22
15	53	62	23	28
16	55	39	24	35
17	50	49	23	41
18	55	49	24	38
19	50	59	24	65
20	56	47	24	28
21	28	53	25	51
22	56	61	27	57
23	58	42	26	41
24	47	55	26	75
25	62	61	27	30
Média	49,4	48,56	24,28	42,68
Desvio padrão	10,06	8,77	1,74	15,33

Fonte: O AUTOR

Nas sobrelevações de temperatura no regime de sobrecarga as conexões já chegaram ao ápice da deterioração e não apresentam mais aumento de amplitude na variação do valor. O conector 3 apresentou um desvio padrão pequeno, inferior a 2°C e temperatura sempre inferior ao condutor principal com uma queda média em relação a ele de 31,48ºC no regime permanente e de 51,32ºC em regime de sobrecarga. Caso todos os conectores tivessem apresentado o mesmo resultado que o conector 3, o conector do tipo perfurante teria passado no teste. A Figura 34 mostra o gráfico das sobre-elevações de temperatura em regime de sobrecarga.

Figura 34 – Gráfico das sobre-elevações de temperatura em regime de sobrecarga

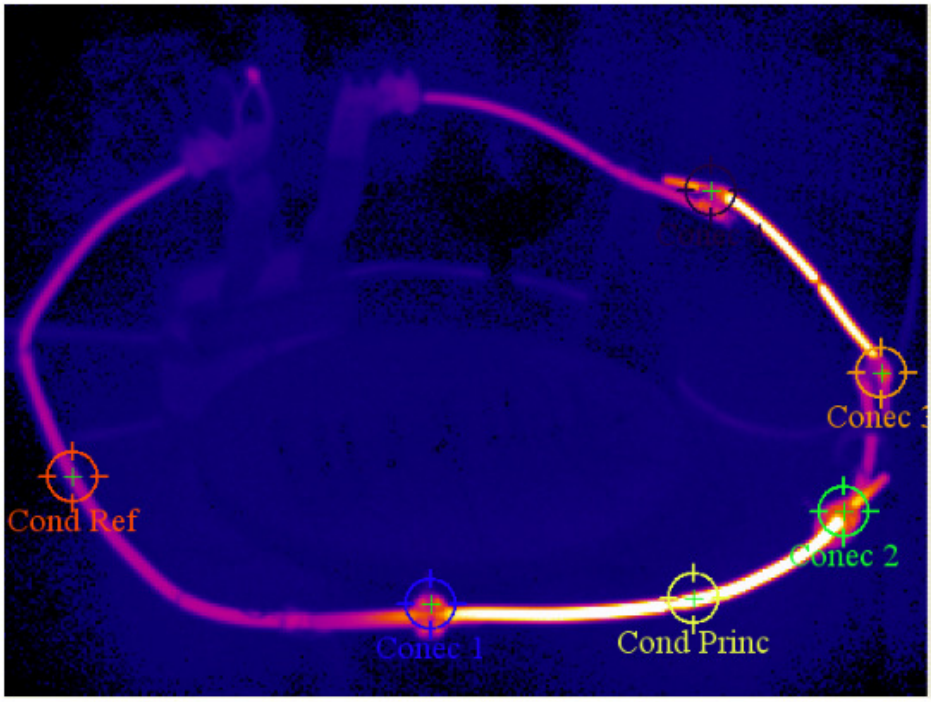


Fonte: O AUTOR

6.4.IMAGENS TÉRMICAS

Foram registradas algumas fotos com a câmera de termovisão para fins qualitativos. Na Figura 35 é possível observar uma imagem completa do circuito de ensaio.

Figura 35 – Imagem térmica do circuito de ensaio

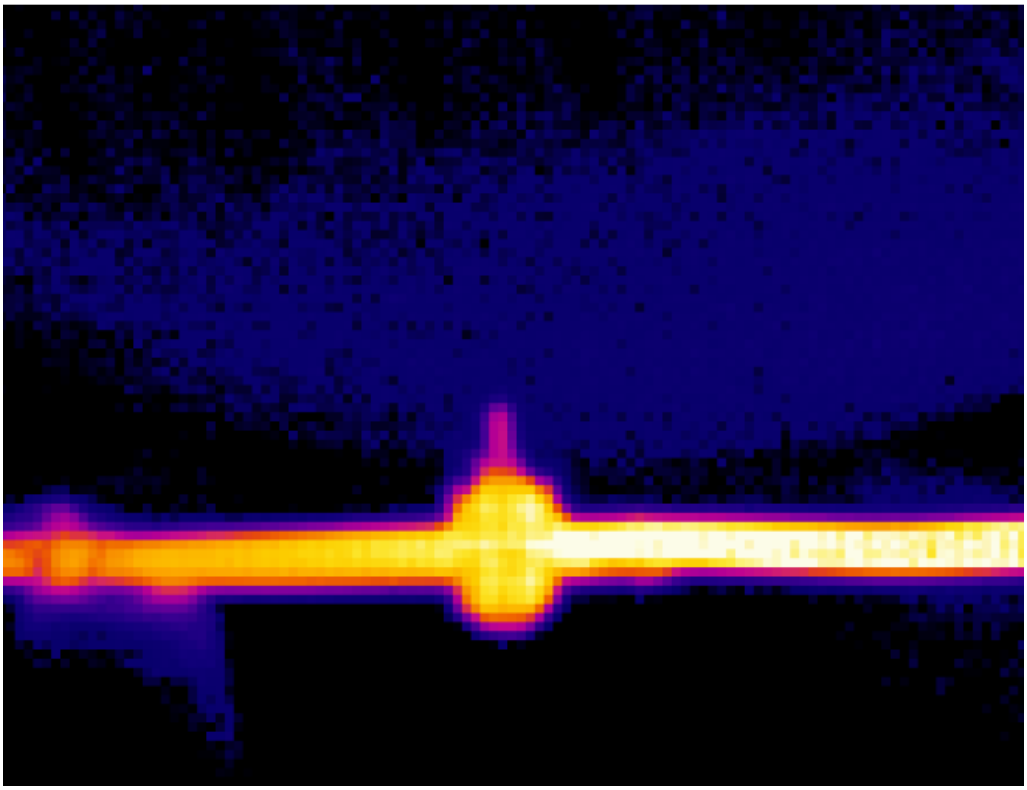


Fonte: O AUTOR

É interessante observar pela imagem que os condutores de alumínio esquentam bem mais que os de cobre apresentando uma cor mais clara segundo a paleta de cor escolhida para imagem. Já se esperava este comportamento em função das bitolas e dos materiais dos condutores. Em regime permanente a diferença média de temperatura entre eles foi de 44,56°C, e em regime de sobrecarga foi de 75,5°C.

Na Figura 36 é possível observar uma ampliação da imagem onde consta o conector 1.

Figura 36 – imagem ampliada do conector



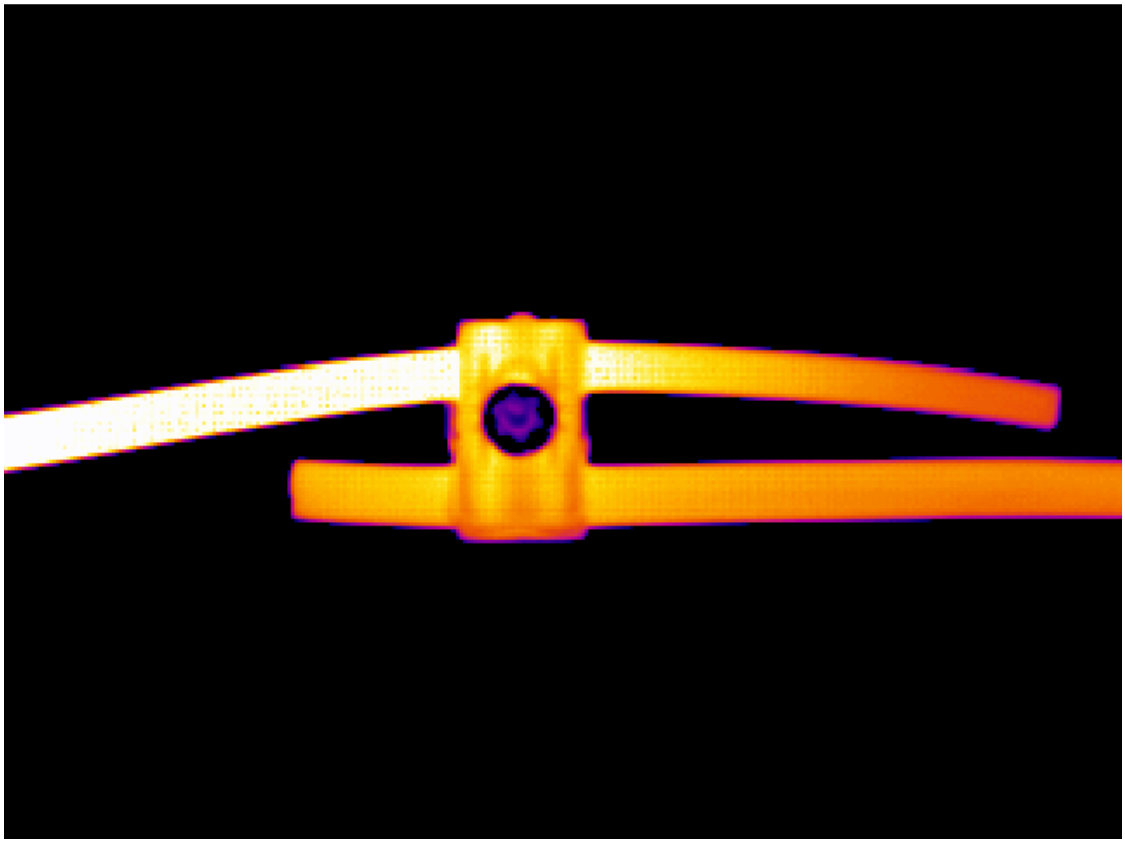
Fonte: O AUTOR

É possível observar que a resolução da câmera é muito baixa e não é possível distinguir qual o ponto mais quente do conector para poder monitorá-lo. A baixa resolução acarreta que o *spot,* a área da superfície que é integrada, é muito grande. Como é necessário monitorar e focar vários pontos do circuito, a câmera fica a uma distância grande já que a lente possui pequena abertura. Quanto mais distante a câmera, maior o tamanho do *spot* e pior a qualidade da medida. Seria necessário para esta aplicação uma câmera de termovisão de resolução maior, o que acarreta em um custo financeiro maior.

Na Figura 37 a câmera foi colocada a poucos centímetros do conector para que se pudesse observar o gradiente de temperatura na superfície dele. Observa-se que a região

superior que esta em contato com o condutor de alumio esquenta mais do que a que está em contato com o condutor de cobre. Observa-se também que a região onde possui as duas hastes metálicas internas que realizam o contato elétrico esquenta mais do que o restante do conector, este detalhe é melhor observado na região inferior.

Figura 37 – imagem focada no conector



Fonte: O AUTOR

As extremidades dos condutores que excedem o conector possuem cor mais escura, significando que a temperatura é menor. Isto ocorre porque nesses trechos não há passagem de corrente elétrica e não há aquecimento por efeito Joule. Porém, ainda assim, a temperatura é alta pois os metais são ótimos condutores de calor e o calor é transportado até a extremidade do condutor, ainda que não passe corrente elétrica por ela. O círculo preto no centro é o parafuso do conector, ele aparece em cor preto porque os metais possuem baixa emissividade térmica. Apesar da câmera de termovisão estar apropriando uma temperatura muito baixa, a temperatura real está próxima a temperatura do conector.

7. CONCLUSÕES

Ao se analisar os resultados obtidos chega-se a conclusão que o conector do tipo perfurante não pode ser utilizado para aplicação a qual este trabalho propôs inicialmente. Ele não atende aos critérios de desempenho definidos pela norma NBR5370. Em alguns ciclos a temperatura do conector foi superior a temperatura do condutor principal, isso já faz com que o conector seja rejeitado no teste.

A NBR5370 também define que a variação máxima das sobrelevações das temperaturas na conexão em relação ao valor médio obtido destes valores deve ser de 5ºC. Apenas o conector 3 ficou dentro deste limite, mesmo que apenas um conector apresentasse defeito o conector já seria rejeitado pela norma.

Basicamente o que a norma diz é que a temperatura no conector não pode exceder o restante do circuito e também deve se manter constante dentro de uma faixa pequena de valores. Se o conector esquenta mais do que os condutores que fazem a conexão ou mantém uma oscilação na temperatura é porque a conexão não é adequada. A conexão está deteriorada e traz instabilidade para o circuito, variando a resistência elétrica de maneira desordenada.

Observando os gráficos das sobrelevações de temperatura é interessante notar que com exceção do conector 3, todos os outros apresentaram uma oscilação na temperatura a cada ciclo. Quanto maior o desvio padrão que mede a dispersão dos valores de sobrelevações dos conectores, pior é o estado da conexão, mais instável ela é. O valor médio da sobrelevação do conector também indica o estado da conexão. Quanto maior a temperatura média, maior é a deterioração da conexão.

O que mais foi interessante observar foi que a temperatura nos conectores não aumentou de maneira constante durante a realização dos ensaios como se esperava, o que aumentou foi a amplitude da variação da temperatura. Chegou-se a conclusão que a área de contato é uma variável aleatória para conexões deterioradas.

Por fim, também concluiu-se com este trabalho de que apesar das normas brasileiras não serem referentes a conectores do tipo perfurante, com algumas adaptações foi possível obter resultados passíveis de análise e que puderam apresentar o comportamento dos conectores de forma a poder emitir um parecer a cerca da sua adequação ou não. Para este caso, se apresentou inadequado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Kagan, N. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica.** Brasil 2005.

[2] Darodda, G. **Apresentações Cursos CETAF**. Brasil 2013.

[3] Timsit R. **The connector TekNote**. Canadá 2007. Disponível em http://www.timron-inc.com/teknote_Mar2007.html.

[4] Holm, R. **Eletric Contacts**. Germany 1967.

[5] CEEE-D. **PTD-00.001 – Materiais para redes aéreas de distribuição**. Brasil 2013.

[6] CEEE-D. **NTD-00.049 – Execução de conexão dos ramais de ligação com conectores do tipo cunha**. Brasil 2008.

[7] NBR5370 – **Conectores de cobre para condutores elétricos em sistemas de potência.** Brasil 1987.

[8] NBR9326 – **Conectores para cabos de potência – ensaios de ciclos térmicos e curtos-circuitos.** Brasil 1986.

[9] NTD-00.001 – **Elaboração de projetos de redes aéreas de distribuição urbanas.** Brasil 2013.

[10] Bonfim, M. **Integridade de sinais elétricos - UFPR**. Brasil 2014. Disponível em http://www.eletr.ufpr.br/marlio/mestrado/te746/SI01.pdf.

[11] Ferreira, A. **Condução de calor – disciplina fenômenos de transporte – Instituto federal de educação, ciência e tecnologia**. Brasil 2012.

[12] Gerner, V. **Coeficiente global de transmissão de calor (U)**. Brasil, 2012

[13] NBR8182 – **Cabos de potência multiplexados autossustentados com isolação extrudada de PE ou XLPE, para tensões até 0,6/1kV**. Brasil 2011.

[14] NBR7288 – **Cabos de potência com isolação sólida extrudada de cloreto de polivinila (PVC) ou polietileno (PE) para tensões de 1kV a 6kV**. Brasil 1994.

[15] Mauro, M. **Trabalho de diplomação – UFRGS – Uso da termografia como ferramenta não destrutiva para avaliação de manifestações patológicas ocultas**. Brasil 2011.