



**XX SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

## **GRUPO - III**

### **GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO- GLT**

#### **MEDIÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS EM CONDUTORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SOB CONDIÇÕES DE TRACIONAMENTO E TEMPERATURA NOMINAIS DE OPERAÇÃO.**

**Marcos José Mannala (\*)  
LACTEC**

**João Nelson Hoffmann  
LACTEC**

## **RESUMO**

Os valores de impedância em cabos condutores de linhas de transmissão e distribuição são normalmente calculados teoricamente a partir das propriedades físicas dos fios componentes do cabo, sendo que as normas técnicas aplicáveis não contemplam ensaios para as medições destes parâmetros.

Os valores são determinados apenas para a temperatura ambiente e não simulam as condições próximas a realidade, como o tracionamento do condutor. Este artigo apresenta uma nova metodologia para medição da resistência elétrica de cabos nus de alumínio, com a finalidade de comparação entre diferentes configurações de cabos e subsídios para análise da viabilidade de projetos e reformas em linhas de transmissão.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Impedância elétrica em cabos, ensaios automatizados, cabo de alumínio nu, linhas de transmissão.

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

A nova metodologia apresentada estabelece uma forma para determinação mais precisa dos parâmetros elétricos do condutor obtendo-os em condições mais próximas do real. A realização da aquisição dos dados é feita durante a aplicação da corrente nominal do condutor e tração mecânica de projeto, abrangendo toda faixa de temperatura prevista no projeto da linha, podendo-se garantir uma maior proximidade com as condições encontradas em campo.

A determinação mais precisa dos parâmetros, como resistência elétrica, tem influência também sobre os cálculos de temperatura de projeto da linha de transmissão e em consequência sobre as flechas do condutor e distâncias de segurança. Para tal, foi estabelecida como premissas a obtenção destes parâmetros durante a aplicação da corrente elétrica nominal, para que ocasione o aumento da temperatura do condutor e a consequente dilatação térmica.

### **2.0 - REALIZAÇÃO DA MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS NA ATUALIDADE**

O valor da resistência elétrica de um cabo condutor depende de diversos fatores, entre os quais a temperatura, o encordoamento do cabo e o efeito *skin*.

Atualmente não há ensaio especificado em normas técnicas para a medição da resistência elétrica de cabos condutores para linhas aéreas. A norma NBR 7270 especifica os seguintes pontos:

- Para efeito de cálculo, a resistividade volumétrica dos fios de alumínio deve ser considerada como  $0,028264 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ , a  $20^\circ\text{C}$  (alumínio 1350);
- No que se refere à resistência elétrica do cabo, é apresentada uma Tabela para a correção dos valores calculados para os fios componentes do cabo, levando em consideração o encordoamento. Esta correção varia de 1,5 a 3,0 %, dependendo do encordoamento, sendo de 2,5% para os cabos usuais de formação 26/7;
- No cálculo da resistência elétrica do condutor completo, a alma de aço não deve ser considerada;
- Nos ensaios de recebimento, é especificado ensaio de verificação da condutividade do fio de alumínio componente do cabo, apenas.

Portanto, a resistência elétrica do cabo condutor completo não é medida, apenas calculada a partir de parâmetros físicos dos fios de alumínio componentes do cabo, com coeficientes de correção para outros fatores que interferem sobre o valor desejado.

### 2.1 Resistência em Corrente Contínua

Nas faixas usuais de operação dos cabos ( $0-120^\circ\text{C}$ ), a resistência em CC de um fio de alumínio é considerada proporcional à temperatura, sendo expressa por:

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha_1 (T_2 - T_1)] \quad (1)$$

onde:

$R_1$ ,  $R_2$ , Resistência elétrica na temperatura  $T_1$  e  $T_2$ ;

$\alpha_1$ , Coeficiente de variação da resistência na temperatura  $T_1$ , variando na prática entre 0,0035 e 0,0045, dependendo da resistividade do fio e da temperatura.

Para calcular a resistência CC de um condutor, pode-se utilizar o método descrito na referência (1), no qual, resumidamente, calcula-se a resistência elétrica de cada fio (seção x resistividade elétrica) e corrige-se pelo fator de encordoamento, considerando então uma associação em paralelo dos fios e finalmente, corrigindo-se para a temperatura desejada.

### 2.2 Resistência em Corrente Alternada (CA)

Os condutores oferecem maior resistência elétrica em CA do que em CC, devido ao efeito *skin*, histerese e outros fenômenos. A referência (2), dentre outras, permitem estimar a influência destes fenômenos por meio de correções ao valor calculado para CC, valores estes que podem chegar a 15% de acréscimo em casos práticos.

Em resumo, os seguintes valores são típicos (tabela 1) para o cabo CAA 636 MCM comumente utilizado e servirá como base de comparação para os ensaios realizados em amostras e descritos nas seções seguintes:

Cabo	Resistência elétrica ( $\Omega / \text{m}$ )		
	$20^\circ\text{C}$ , CC	$25^\circ\text{C}$ , CA	$75^\circ\text{C}$ , CA
636 MCM CAA	0,0877	0,0902	0,1077

Tabela 1 – Dados dos parâmetros elétricos típicos encontrados para o cabo 636 MCM – Grosbeak.

As normas consultadas para descrição do levantamento da resistência elétrica em corrente contínua basearam-se nas normas NBR 6814 (3) e ASTM B 193 (4). Essas normas descrevem o procedimento para corrente contínua, embora este trabalho execute também a determinação da resistência em corrente alternada.

### 2.3 Equipamentos necessários

A resistência poderá ser medida por ponte dupla tipo Kelvin ou um potenciômetro desde que a resistência da amostra seja inferior a  $1 \Omega$  ou menos. Uma ponte de Wheatstone pode ser utilizada também, no caso da amostra possuir acima de  $1 \Omega$ .

### 2.4 Procedimento de realização do ensaio

Os levantamentos dimensionais da amostra devem ser feitos utilizando instrumentos de medição de no mínimo 0,05 % (4). Deve-se tomar o cuidado de medir o comprimento dos terminais do potencial de medição a partir do lado interno do vão analisado.

A dimensão da seção transversal da amostra deve ser levantada através da medição dos diâmetros dos fios através de um micrômetro. O número de medições deve ser o suficiente para que se tenha uma média dentro de 0,10 %.

Quando forem utilizados terminais para leitura dos potenciais, deve-se manter a distância de cada terminal potencial com o correspondente de corrente a uma distância de no mínimo 1,5 vezes o perímetro da amostra. O circuito de medição não deve influenciar significativamente no valor da resistência medida. Para isso deve se adotar uma forma de compensar o valor de resistência adicional incrementada pelos acessórios dos equipamentos utilizados.

A precisão das medidas elétricas deve ser de 0,15 %. Deve se cuidar com que a temperatura ambiente seja a mesma da amostra. O valor da corrente utilizada e o tempo de aplicação da corrente devem ter um valor que não altere significativamente o valor de temperatura da amostra, durante a seqüência de aquisição dos valores de resistência. O valor de corrente aplicado deve ser o bastante para gerar uma queda de tensão suficiente para que haja precisão na leitura, mantendo a precisão de 0,15 %. As superfícies de contato deverão ser mantidas limpas e desengraxadas, para que não seja inserida resistência adicional a leitura.

### 3.0 - METODOLOGIA PARA LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS

O objetivo da realização das medições nos cabos condutores ensaiados é estar o mais próximo das condições reais encontradas em linhas de transmissão. Os cuidados das medições dos parâmetros elétricos não levaram em conta somente o parâmetro da resistência elétrica em corrente contínua.

Nesta metodologia, a diferença em relação a uma medição usual, ou em relação aos valores teóricos calculados, é que as medições são realizadas com o cabo sob tração constante, e submetido à variação de temperatura, simulando assim as condições mais próximas do real para o cabo condutor.

#### 3.1 Equipamento de medição utilizado para o levantamento dos parâmetros elétricos

Por se tratar de uma condição mais próxima do real, não basta apenas um ou dois equipamentos para obtenção do levantamento dos parâmetros elétricos para a condição desejada. Trata-se de um aparato de sensores e equipamentos de medição que compõe um sistema mais complexo, conforme apresentado a seguir.

##### 3.1.1 Descrição da bancada de tração

A bancada foi construída dentro do laboratório de ensaios mecânicos do LACTEC, no campus da Universidade Federal do Paraná, em uma área total de 84 m<sup>2</sup> e comprimento total de 21 m.

Esta bancada possui um vão útil de 14 m e capacidade de 300 kN de tração e compressão, tendo o corpo da bancada um comprimento total de 20 m. (Vide Figura 1). O sistema de acionamento é formado por motor elétrico, redutor, engrenagens de fusos.



Figura 1 – Bancada de ensaios

##### 3.1.2 Sistema de aquisição e controle

O sistema de controle é composto por um microcomputador com placas de aquisição e controle da National Instruments® (NI). O programa de controle foi desenvolvido com a ferramenta Labview® (National Instruments, Inc.) possibilitando a automação do conjunto, realizando as medições e controle de tração automaticamente, com acompanhamento gráfico em tempo real.

Todas as medições da resistência elétrica da amostra, deslocamento e tração são adquiridas para fins de controle e também registradas em memória. As informações registradas na memória compõem os gráficos e relatórios apresentados em tempo real e cálculos realizados no fim das medições.

### 3.1.3 Fonte de corrente

Para a geração de corrente no condutor, usa-se um transformador de corrente com capacidade máxima de 3.kA. Para a alimentação do transformador de corrente é utilizado um variador de tensão de 0 – 440 V com potência de 80 kVA. Com este conjunto, consegue-se variar a corrente na amostra ensaiada, atingindo valores de corrente que permitem o aquecimento a temperaturas elevadas do condutor de grandes seções. Com isso se adquire os valores dos parâmetros não somente a temperatura ambiente, mas nas temperaturas de projetos e até temperatura de trabalho emergencial.

### 3.1.4 Sensores e transdutores que compõe o sistema

Como o ensaio é realizado a tração controlada, o sistema de tração possui uma célula de carga. Esta célula de carga fecha a malha do sistema, permitindo o controle do valor de tração desejada. Como o laboratório ensaia uma larga faixa de cabos, trabalha-se com células que partem de 100 até 33.000 kgf.

Para a medição da temperatura, são utilizados sete termopares tipo E. Eles são distribuídos na amostra de forma se obtenha uma média precisa da temperatura. Como os terminais de corrente funcionam como dissipadores ou geradores de calor, próximo a estas conexões têm-se um valor de temperatura diferente, principalmente quando se trata de correntes elevadas, onde o gradiente de temperatura fica evidente. O trecho principal para o qual ocorre a determinação dos parâmetros elétricos deve possuir temperatura o mais uniforme possível.

O ensaio é realizado a partir de temperatura ambiente até temperaturas elevadas. O que ocorre durante o processo é que o aquecimento gera a variação do comprimento do condutor pelo efeito da dilatação térmica. Para compensar a variação do comprimento inicial do condutor, são instalados transdutores de deslocamento que medem a variação deste comprimento no decorrer do processo.

Para as medições de corrente é utilizado um transformador de corrente (TC) de janela de precisão de 0,1%. O condutor de alimentação da amostra passa através da janela do TC, e na saída do TC instala-se um *shunt* de precisão.

Para a aquisição do valor da queda de tensão no cabo testado, são dois canais de tensão de uma placa que utiliza o barramento PCI de um *desktop*, um para medição do *shunt* e outro para a queda de tensão do condutor. Cada canal possui 24 bits de precisão, com resolução de 10 nV, para a faixa de +/- 0,1 V. A leitura de tensão pico a pico máximo é de +/- 10 V.

## 3.2 Metodologia desenvolvida no LACTEC

O método desenvolvido levou em consideração normas para as medições elétricas brasileiras e internacionais como a NBR 6814/1985 (3) e a ASTM B 193/95 (4). Como se propunha uma disposição mais próxima do real encontradas em campo se fez necessário uma composição eletro termomecânica para a determinação dos parâmetros elétricos. A seguir é descrito a metodologia para o levantamento dos parâmetros elétricos.

### 3.2.1 Preparação da amostra

Esta etapa é realizada por dois homens. A amostra de cabo tem as terminações preparadas em um ambiente separado, obedecendo à norma NBR 7273 (5). Nesta amostra de cabo são prensados dois equalizadores com o objetivo de realizar as leituras de tensão. O vão entre os equalizadores é de 4 m, distribuídos no meio do vão de 11 m.

### 3.2.2 Instrumentação da amostra

Antes da instalação da amostra, as células de carga possuem os ganhos e zeros checados. Na seqüência o condutor é pré-tensionado o bastante para suspendê-lo e também permitir a introdução dos termopares na primeira coroa de fios da amostra testada. São instalados três termopares entre os equalizadores e os outros

quatro são distribuídos dois a dois opostamente, entre os equalizadores e os terminais de ancoragem, conforme figura 4 adiante.

O TC de janela é instalado em um dos braços do gerador de corrente, juntamente com o *shunt*. Os dois conectores vindos do transformador de corrente são presos a dois metros de cada equalizador, fora do vão de 4 m destinado as medições. As conexões para leitura dos sinais de tensão do *shunt* e dos equalizadores são conectadas na placa de aquisição, que se encontra dentro do PC.

O cabo então é carregado à tração de projeto da linha. Após a estabilização do valor da tração os dois transdutores de deslocamentos são regulados no curso de medição, de tal forma que não haja saturação no decorrer do levantamento dos parâmetros elétricos (ver figura 4).

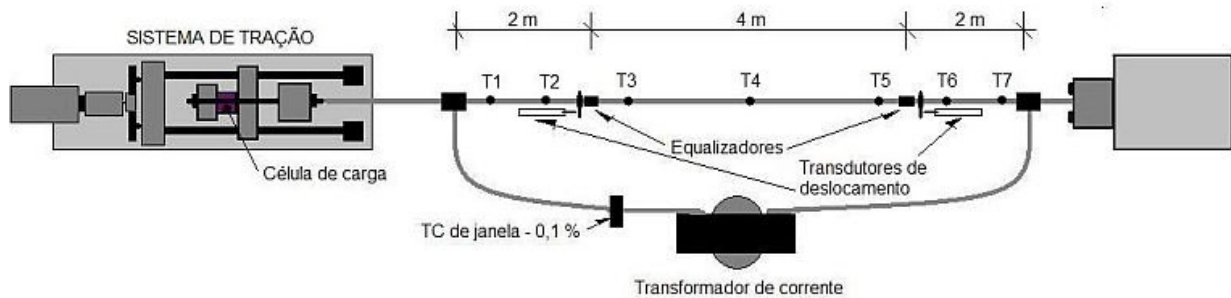


Figura 2 – Esquema de montagem para medição dos parâmetros elétricos.

### 3.2.3 Realização do ensaio

Com o condutor tracionado no valor de ensaio, aplica-se corrente no cabo no valor nominal de corrente fornecido pelo fabricante. Em seguida inicia-se a aquisição na taxa de 1,7 s dos dados de tração, temperatura dos sete termopares, variação do comprimento do vão de quatro metros através dos transdutores de deslocamento, e os valores de tensão do *shunt* e queda de tensão entre os equalizadores.

A cada aquisição de dados ocorre também a atualização dos gráficos do ensaio. Os gráficos que podem ser acompanhados em tempo real são: valor de tração, do valor de resistência do condutor, valor de corrente, temperatura e de indutância da amostra ensaiada.

Quando o condutor atinge a temperatura máxima do ensaio, a aplicação de corrente é desligada. O condutor automaticamente é aliviado, pois a tração aumenta devido à queda de temperatura e o conseqüente encolhimento do condutor. Os gráficos então congelam, devido à parada do ensaio, tendo-se o resultado final do ensaio.

## 4.0 - APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Para analisar os resultados da metodologia, é apresentada uma comparação entre dois condutores. O primeiro é um cabo condutor convencional, já largamente aplicado em LT's. O segundo é uma evolução do primeiro, com fios de alumínio trapezoidais ao invés de seção circular. Possui superfície lisa para minimizar as vibrações causadas pelo vento. Detalhes são descritos a seguir.

### 4.1 Descrição das amostras

Foram escolhidas duas amostras de condutores com seções iguais, e mesmos materiais, alumínio com alma de aço. Os dois condutores foram submetidos à metodologia descrita no capítulo três. A seguir os dados técnicos das duas amostras:

- CAA Grosbeak - 636 MCM sendo que a área do alumínio (liga 1350) é de 377 mm<sup>2</sup>, 26 fios de seção circular de 3,973 mm e 7 fios de aço com diâmetro de 3,09 mm;
- CAA Grosbeak - 636 MCM com fios trapezoidais, sendo que a área do alumínio (liga 1350) é de 407 mm<sup>2</sup>, 26 fios em perfil Z e 7 fios de aço com diâmetro de 3,09 mm;

### 4.2 Resultados do levantamento dos parâmetros elétricos

O parâmetro determinado foi o de resistência em corrente contínua e alternada para as duas amostras. Primeiro foi levantado o parâmetro em corrente contínua a temperatura ambiente, e na seqüência determinado o valor da resistência em corrente alternada. Após os ensaios foram feitos os cálculos da resistência das amostras em corrente contínua e alternada para a temperatura de 20 °C.

As figuras 5 e 6 apresentam os gráficos de resistência em corrente alternada. Em seguida a tabela 2 mostra os valores obtidos nas temperaturas de trabalho do condutor. Nesta tabela também são comparados os valores obtidos em corrente contínua através do teste de laboratório.

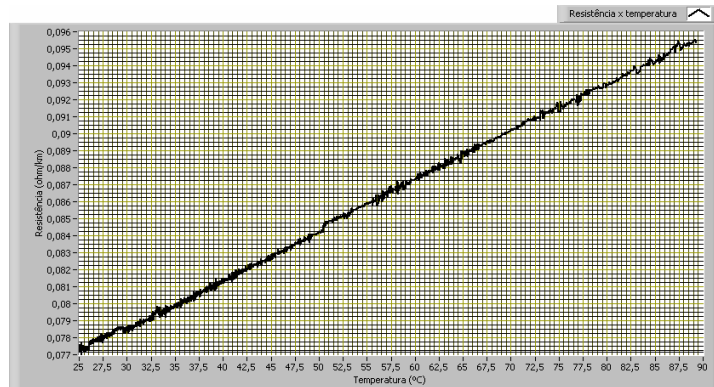


Figura 3 – Gráfico Resistência x Temperatura do cabo CAA Grosbeak com fios trapezoidais

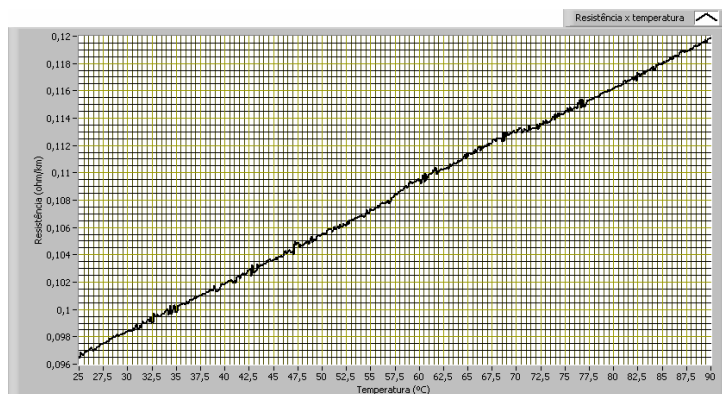


Figura 4 – Gráfico Resistência x Temperatura do cabo CAA Grosbeak.

Item	Temperatura (°C)	Resistência 636 MCM com fios trapezoidais (Ohm/km)	Resistência 636 MCM (Ohm/km)	Resistência cc (Ohm/km)
1	20			0,0694/0,0896
2	20	0,0757*	0,0948*	
3	25	0,0772	0,0966	
4	50	0,0843	0,1055	
5	75	0,0915	0,1145	
6	90	0,0958	0,1199	

\*Valor extrapolado.

Tabela 2 – Valores de resistência ca obtidos em diferentes temperaturas e resistência cc a 20 °C. AERO Z

## 5.0 - APLICAÇÃO PRÁTICA EM PROJETOS

Os valores medidos para a resistência elétrica do cabo CAA Grosbeak 636 MCM resultaram de até 8% superiores aos valores tabelados e que tem sido largamente utilizado nos diversos estudos do sistema elétrico e também na definição das temperaturas de projeto que definem as catenárias dos cabos condutores.

Neste item será avaliada a influência deste acréscimo no valor da resistência, sobre cada um destes parâmetros.

### 5.1 Perdas por aquecimento dos cabos

As perdas na transmissão por efeito Joule ( $R \times I^2$ ) são diretamente proporcional à resistência ôhmica dos condutores e, portanto, o cabo condutor utilizado nos estudos deste artigo levaria a uma perda na transmissão de até 8% superior ao valor originalmente previsto utilizando parâmetros tabelados.

### 5.2 Ampacidade

Considerando que uma LT tenha sido projetada para 75 °C, mediante cálculos com vento de 1 m/s, temperatura ambiente de 30 °C, a ampacidade seria definida pelos gráficos da Figura 5 a seguir, significando uma redução da ordem de 5% na Ampacidade da LT.

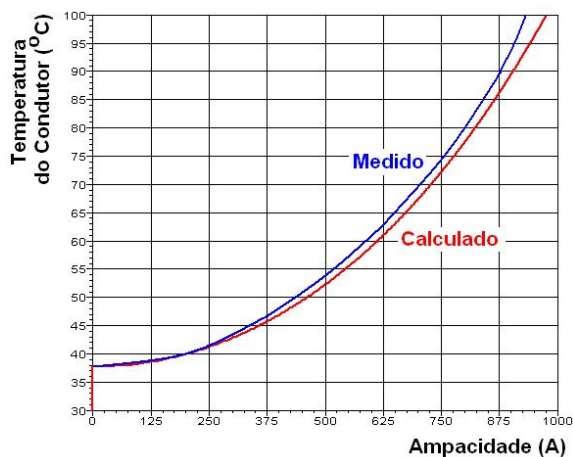


Figura 5 - Ampacidade da LT com os valores Calculados e Medidos da Resistência elétrica do condutor.

### 5.3 Temperatura de Projeto

Pela Figura 5 apresentada se observa que a variação na temperatura de projeto da linha de transmissão, para a mesma ampacidade, é da ordem de 2 a 3 graus de acréscimo. Isto implicará num aumento da flecha, porém não significativo, no projeto da linha de transmissão, já que para o cabo 636 MCM e vão típico de 400 m este acréscimo é da ordem de 0,12 m, e da ordem de 0,15 m para um vão de 800 m.

## 6.0 - CONCLUSÃO

A comparação dos dois cabos ensaiados, através da nova metodologia de ensaio, revelou uma precisão maior na determinação do levantamento dos parâmetros elétricos. Os dados fornecidos pelo *software* no ensaio da determinação da resistência CA forneceu um gráfico para cada condutor com 2.000 pontos e não somente poucas dezenas para se ter apenas um valor médio de resistência a dada temperatura. Também se obtém a resistência CA para cada temperatura a cada décimo °C. Tudo isso com a abordagem dos ensaios mais próxima da realidade encontrada em campo, podendo antecipar a aplicação de novas tecnologias em projetos de linhas com maior segurança.

A aplicação do resultado obtido no ensaio do cabo CAA 636 MCM é significativo, pois a determinação das perdas por efeito Joule foi de até 8%, com a conseqüente redução de 5% da ampacidade da linha nas condições posta no item 5.2. Isto tem um peso sensível na análise econômica de viabilidade no projeto de recapacitação e ou construção de linhas de transmissão. Os acréscimos do valor da flecha, embora pequenos, é conseqüência do acréscimo da resistência CA revelados nas medições. Pelo método convencional de medidas da resistência em corrente contínua os resultados foram similares aos tabelados/calculados, portanto, diferente do que foi levantado com a nova metodologia empregada.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Standard Handbook for Electrical Engineers ; Fink, D.G. - Beaty, H.W. ; McGraw-Hill; 1993.
- (2) Skin Effect in Tubular and Flat Conductors; Dwight, H.B., Trans. AIEE, 1918.
- (3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ensaio de resistência elétrica – NBR 6814. Brasil.
- (4) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Resistivity of electrical conductor materials – B 193 - 95 – United States of America.
- (5) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Condutor elétrico de alumínio – Retirada e preparo de corpo de prova para ensaio de tipo - NBR 7273. Brasil.