

## Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL

### Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST

#### Módulo 7– Cálculo de Perdas na Distribuição

Revisão	Motivo da Revisão	Instrumento de aprovação pela ANEEL	Data de vigência
0	Primeira versão aprovada (após realização da AP 014/2008)	Resolução Normativa nº 345/2008	De 31/12/2008 a 31/12/2009
1	Revisão 1 (após realização da AP 033/2009)	Resolução Normativa nº 395/2009	01/01/2010

## MÓDULO 7 – CÁLCULO DE PERDAS NA DISTRIBUIÇÃO

### ÍNDICE

<b>SEÇÃO 7.0 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>1 OBJETIVO .....</b>	<b>3</b>
<b>2 ABRANGÊNCIA .....</b>	<b>3</b>
<b>3 CONTEÚDO .....</b>	<b>3</b>
<b>4 DAS ALTERAÇÕES DESTA REVISÃO .....</b>	<b>4</b>
<b>SEÇÃO 7.1 – PREMISSAS DE CÁLCULO E INDICADORES .....</b>	<b>5</b>
<b>1 OBJETIVO .....</b>	<b>5</b>
<b>2 PREMISSAS DE CÁLCULO .....</b>	<b>5</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>6</b>
<b>4 INDICADORES DE PERDAS .....</b>	<b>7</b>
<b>5 DADOS E INFORMAÇÕES A SEREM FORNECIDAS PARA O CÁLCULO DAS PERDAS .....</b>	<b>9</b>
<b>SEÇÃO 7.2 – CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS DE POTÊNCIA .....</b>	<b>10</b>
<b>1 OBJETIVO .....</b>	<b>10</b>
<b>2 PERDAS DE POTÊNCIA EM SDMT .....</b>	<b>10</b>
<b>3 PERDAS DE POTÊNCIA EM SDBT .....</b>	<b>13</b>
<b>4 PERDAS DE POTÊNCIA EM UNIDADES TRANSFORMADORAS .....</b>	<b>15</b>
<b>5 PERDAS DE POTÊNCIA EM RAMAIS DE LIGAÇÃO E MEDIDORES .....</b>	<b>15</b>
<b>SEÇÃO 7.3 – CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS DE ENERGIA .....</b>	<b>17</b>
<b>1 OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
<b>2 PERDAS DE ENERGIA EM SDAT .....</b>	<b>17</b>
<b>3 PERDAS DE ENERGIA EM SDMT .....</b>	<b>17</b>
<b>4 PERDAS DE ENERGIA EM SDBT .....</b>	<b>18</b>
<b>5 PERDAS DE ENERGIA EM UNIDADES TRANSFORMADORAS .....</b>	<b>18</b>
<b>6 PERDAS DE ENERGIA EM RAMAIS DE LIGAÇÃO E MEDIDORES .....</b>	<b>18</b>
<b>ANEXO I – CÁLCULO DA DENSIDADE DE CARGA POR MEIO DA DISTÂNCIA DE CARGA EQUIVALENTE .....</b>	<b>19</b>
<b>ANEXO II – LEI GERAL DE PERDAS PARA SDMT .....</b>	<b>22</b>

---

Assunto: Introdução	Seção: 7.0	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 3 de 22
------------------------	---------------	---------------	---------------------------------	--------------------

## **SEÇÃO 7.0 – INTRODUÇÃO**

### **1 OBJETIVO**

- 1.1 Estabelecer a metodologia e os procedimentos para obtenção dos dados necessários para apuração das perdas dos sistemas de distribuição de energia elétrica.
- 1.2 Definir indicadores para avaliação das perdas nos segmentos de distribuição de energia elétrica.
- 1.3 Estabelecer a metodologia e os procedimentos para apuração das perdas dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

### **2 ABRANGÊNCIA**

- 2.1 São apuradas e avaliadas as perdas técnicas decorrentes da energia elétrica entregue às unidades consumidoras (incluídos os consumidores livres), às outras distribuidoras e ao consumo próprio da distribuidora.
- 2.2 As perdas não técnicas são determinadas pela diferença entre a energia injetada e a energia fornecida, incluindo, nessa última, os montantes de energia relativos às perdas técnicas.
- 2.3 São consideradas somente as perdas técnicas de responsabilidade da distribuidora, incluindo seu sistema de distribuição e as demais instalações de transmissão – DIT, quando couber.

### **3 CONTEÚDO**

- 3.1 O módulo é composto de 4 (quatro) seções, a saber:
  - a) Seção 7.0 – **INTRODUÇÃO**;
  - b) Seção 7.1 – **PREMISSAS DE CÁLCULO E INDICADORES** - define os indicadores de perdas e estabelece as disposições gerais sobre os dados necessários para os cálculos das perdas por segmento de distribuição;
  - c) Seção 7.2 – **CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS DE POTÊNCIA** - estabelece os procedimentos para o cálculo das perdas técnicas de potência dos sistemas de distribuição de energia elétrica;
  - d) Seção 7.3 – **CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS DE ENERGIA** - estabelece os procedimentos para o cálculo das perdas técnicas de energia dos sistemas de distribuição de energia elétrica;

Assunto: Introdução	Seção: 7.0	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 4 de 22
------------------------	---------------	---------------	---------------------------------	--------------------

#### **4 DAS ALTERAÇÕES DESTA REVISÃO**

- 4.1 Foram alterados o item 2.2 da Seção 7.0; os itens 2.8, 2.10, 4.1 e 5.3 da Seção 7.1; o item 5.2.1 da Seção 7.2; e o item 2.1 da Seção 7.3.

Assunto: Premissas de Cálculo e Indicadores	Seção: 7.1	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 5 de 22
--	---------------	---------------	---------------------------------	--------------------

## **SEÇÃO 7.1 – PREMISSAS DE CÁLCULO E INDICADORES**

### **1 OBJETIVO**

- 1.1 Definir os indicadores de perdas e estabelecer as disposições gerais sobre os dados necessários para o cálculo das perdas por segmento de distribuição.

### **2 PREMISSAS DE CÁLCULO**

- 2.1 São desconsiderados os montantes de demanda de potência reativa das unidades consumidoras excedentes à quantidade permitida (valor de referência para fator de potência), sejam elas medidas ou estimadas, nos casos previstos pelo regulamento. Assim, quando o fator de potência típico for menor do que o valor de referência, é adotado este último.
- 2.2 As cargas são consideradas distribuídas de forma equilibrada nas fases das redes trifásicas dos Sistemas de Distribuição em Alta Tensão (SDAT) e Sistemas de Distribuição em Média Tensão (SDMT).
- 2.3 Serão consideradas perdas adicionais de 15% sobre o montante de perdas técnicas calculadas para as redes dos Sistemas de Distribuição em Baixa Tensão (SDBT), devido ao desequilíbrio da carga e o posicionamento assimétrico do transformador em relação às tipologias de rede.
- 2.4 São considerados os níveis de tensão nominal de operação de cada distribuidora.
- 2.5 As perdas nos transformadores são baseadas nos valores normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, para avaliação das perdas totais à carga nominal e a vazio. Na ausência destes, serão adotados valores informados pela distribuidora ou utilizados valores típicos.
- 2.6 Para determinação da resistência ôhmica, a temperatura de operação dos condutores elétricos é considerada constante e igual a 55 ° C.
- 2.7 A distribuidora deve utilizar sistema de informação georeferenciada, em consonância com o estabelecido no Módulo 2 – Planejamento da Expansão da Distribuição, possibilitando assim uma maior acuidade dos dados fornecidos para o cálculo das perdas.
- 2.8 Os dados necessários para a apuração das perdas no sistema de distribuição e nas DITs de uso exclusivo devem ser fornecidos pela distribuidora, conforme estabelecido no Módulo 6 – Informações Requeridas e Obrigações. Para a apuração das perdas podem ainda ser utilizadas demais informações disponíveis na ANEEL.
- 2.9 A distribuidora deve apresentar avaliação das perdas por segmento, apresentando a metodologia utilizada no estudo.

Assunto: Premissas de Cálculo e Indicadores	Seção: 7.1	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 6 de 22
--	---------------	---------------	---------------------------------	--------------------

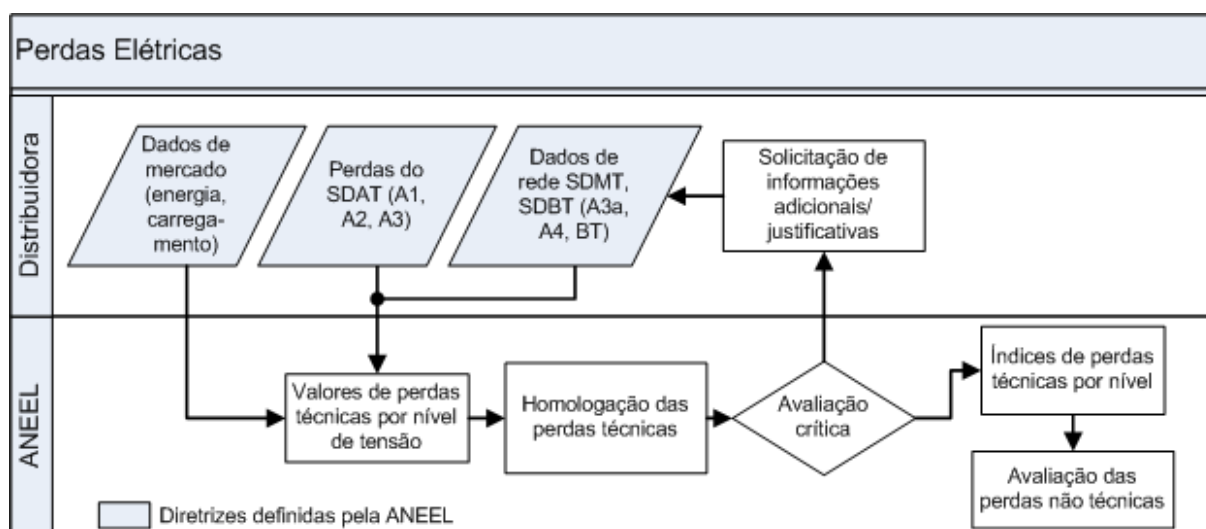
2.10 As perdas nas DITs compartilhadas serão apuradas pela CCEE, que deverá informar os valores para cada distribuidora, de acordo com o estabelecido no Módulo 6.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Procedimento de avaliação

3.1.1 O fluxograma da Figura 1 descreve o procedimento para o cálculo das perdas na distribuição. Consiste na definição das diretrizes a serem obedecidas na apuração dos dados e no estabelecimento da metodologia de cálculo das perdas.

3.1.2 Na avaliação das perdas técnicas a ANEEL poderá considerar especificidades regionais.



**Figura 1** – Fluxograma simplificado do procedimento de avaliação das perdas.

#### 3.2 Procedimento de cálculo

3.2.1 O cálculo das perdas técnicas é realizado para os segmentos de rede, transformação, ramal de ligação e medidor, conforme o seguinte procedimento:

- As redes dos sistemas de distribuição são segmentadas segundo os níveis de tensão dos grupos SDAT (A1, A2 e A3), SDMT (A3a e A4) e SDBT;
- As transformações são segmentadas conforme a relação de transformação (SDAT/SDAT, SDAT/SDMT, SDMT/SDMT e SDMT/SDBT);
- Finalmente, são apuradas as perdas nos segmentos ramal de ligação e medidor.

Assunto: Premissas de Cálculo e Indicadores	Seção: 7.1	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 7 de 22
--	---------------	---------------	---------------------------------	--------------------

- 3.2.2 As perdas de energia das redes do SDAT são apuradas preferencialmente por dados dos sistemas de medição, e, na impossibilidade do uso exclusivo da medição, por estudos de fluxo de carga.
- 3.2.3 Excetuando-se o SDAT, a metodologia consiste na obtenção das perdas de potência e o posterior cálculo das perdas de energia para cada segmento, mediante a apuração do fator de perdas.
- 3.2.4 As perdas de potência nos transformadores são calculadas a partir dos valores estabelecidos de perdas a vazio e totais, considerando o valor declarado do fator de utilização, para cada equipamento informado pela distribuidora.
- 3.2.5 As perdas de potência das redes do SDMT são apuradas com base no "modelo arborescente", cuja tipologia de rede é definida dentro de um setor circular. São considerados estudos específicos para casos em que as características das redes diferem dos padrões de rede típicos considerados no desenvolvimento do referido modelo.
- 3.2.6 As perdas de potência das redes do SDBT são apuradas com base em redes típicas.
- 3.2.7 É adotado um valor de 5% sobre o montante de perdas técnicas totais, devido às perdas técnicas produzidas por efeito corona em conexões, sistemas supervisórios, relés fotoelétricos, capacitores, transformadores de corrente e de potencial, e por fugas de correntes em isoladores e pára-raios.
- 3.2.8 O período de apuração das perdas será preferencialmente anual.
- 3.2.9 Os procedimentos a serem aplicados para a avaliação das perdas técnicas de potência e energia são apresentados nas Seções 7.2 e 7.3, respectivamente.

#### **4 INDICADORES DE PERDAS**

- 4.1 A ANEEL apurará os valores de perdas técnicas em megawatt-hora (MWh) estratificando os valores para cada segmento, conforme os indicadores a seguir definidos:

Assunto: Premissas de Cálculo e Indicadores	Seção: 7.1	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 8 de 22
--	---------------	---------------	---------------------------------	--------------------

Energia Fornecida - EF: energia ativa efetivamente entregue e medida, ou estimada, nos casos previstos pela legislação, às unidades consumidoras, outras distribuidoras e consumidores livres, mais o consumo próprio, em megawatt-hora (MWh);

Energia Injetada - EI: energia ativa efetivamente recebida e medida de um agente, em megawatt-hora (MWh);

Energia Passante - EP (i): total de energia ativa que transita no segmento (i), em megawatt-hora (MWh);

Perdas Técnicas do Segmento - PTS (i): perdas técnicas para cada segmento, em megawatt-hora (MWh);

Perdas Técnicas - PT: corresponde à soma das perdas técnicas de todos os segmentos, em megawatt-hora (MWh);

Perdas na Distribuição - PD: corresponde à diferença entre a Energia Injetada – EI e a Energia Fornecida – EF, em megawatt-hora (MWh);

Perdas Não Técnicas - PNT: corresponde à diferença entre as Perdas na Distribuição – PD e as Perdas Técnicas – PT, em megawatt-hora (MWh);

- 4.2 Além dos montantes em energia elétrica, deverão ser apuradas as relações percentuais, conforme os seguintes indicadores:

Índice de Perdas Técnicas nos Segmentos – IPTS (i): percentual de perdas técnicas em relação à energia que transita em cada segmento:

$$IPTS_{(i)} = \frac{PTS_{(i)}}{EP_{(i)}} \times 100[\%] \quad (1)$$

Percentagem de Perdas Técnicas – PPT: percentual de perdas técnicas em relação à energia injetada:

$$PPT = \left( \frac{PT}{EI} \right) \times 100[\%] \quad (2)$$

Percentagem de Perdas na Distribuição – PPD: perdas totais representadas percentualmente em relação à energia injetada:

$$PPD = \left( 1 - \frac{EF}{EI} \right) \times 100[\%] \quad (3)$$

Percentagem de Perdas Não Técnicas – PPNT: percentual de perdas não técnicas em relação à energia injetada:

$$PPNT = PPD - PPT[\%]$$



Assunto: Premissas de Cálculo e Indicadores	Seção: 7.1	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 9 de 22
--	---------------	---------------	---------------------------------	--------------------

(4)

## **5 DADOS E INFORMAÇÕES A SEREM FORNECIDAS PARA O CÁLCULO DAS PERDAS**

- 5.1 A distribuidora deve utilizar técnicas de medição e de tratamento dos dados necessários para o cálculo das perdas.
- 5.2 A distribuidora deve encaminhar à ANEEL as informações para o cálculo das perdas de acordo com o estabelecido no Módulo 6.
- 5.3 As informações para o cálculo das perdas devem ser apuradas preferencialmente no período de 12 meses completos imediatamente anteriores à data de envio dos dados à ANEEL.
- 5.4 A ANEEL pode solicitar informações adicionais às listadas no Módulo 6, que sejam necessárias para o cálculo das perdas técnicas, quando da existência de particularidades no sistema de distribuição.
- 5.5 Os estudos realizados pela distribuidora e o detalhamento das informações fornecidas devem estar disponíveis para fiscalização da ANEEL, por um período de cinco anos.
- 5.6 Os fatores de carga e perdas das redes e transformações devem ser obtidos dos dados de medição da distribuidora, podendo ser estimados de acordo com a composição do mercado e as curvas de carga típicas das unidades consumidoras.

Assunto: Cálculo das Perdas Técnicas de	Seção: 7.2	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 10 de 22
--	---------------	---------------	---------------------------------	---------------------

## SEÇÃO 7.2 – CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS DE POTÊNCIA

### 1 OBJETIVO

- 1.1 Apresentar a metodologia para a avaliação de perdas técnicas de potência dos sistemas de distribuição de energia elétrica.
- 1.2 Os valores de perdas técnicas de potência são utilizados na definição das perdas técnicas de energia.

### 2 PERDAS DE POTÊNCIA EM SDMT

- 2.1 As perdas de potência das redes do SDMT são calculadas pelo “modelo arborescente”. Nessa modelagem, é necessária a definição do coeficiente de densidade de carga do alimentador, que pode ser obtida por meio da distância da carga equivalente.
- 2.2 Cálculo do Coeficiente de Densidade de Carga do alimentador
  - 2.2.1 A distância da carga equivalente é obtida pela média ponderada da potência nominal dos transformadores de distribuição pela distância destes em relação à subestação, conforme explicitado na expressão a seguir:

$$l_b = \frac{\sum_{i=1}^{Nt} (d_i \times Snom_i)}{\sum_{i=1}^{Nt} Snom_i} \quad (1)$$

Onde:

- $l_b$** : distância da carga equivalente em relação à subestação (origem);  
 **$Nt$** : número total de transformadores (próprios e particulares) conectados da rede;  
 **$d_i$** : distância geográfica do transformador de distribuição à subestação;  
 **$Snom_i$** : potência nominal do transformador  $i$ ;

- 2.2.2 De posse da distância da carga equivalente do alimentador, o valor do coeficiente de densidade de carga do alimentador  $\sigma$  pode ser obtido de acordo com a Tabela 1 desta Seção, onde R é o raio de atuação do alimentador. A demonstração dos valores apresentados consta do Anexo I deste procedimento.

Assunto: Cálculo das Perdas Técnicas de	Seção: 7.2	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 11 de 22
--	---------------	---------------	---------------------------------	---------------------

**Tabela 1** – Avaliação do expoente  $\sigma$  em função de  $I_b/R$ .

Intervalo de $I_b/R$	Expoente $\sigma$
$0,00 \leq I_b/R < 0,55$	-1,0
$0,55 \leq I_b/R < 0,67$	-0,5
$0,67 \leq I_b/R < 0,80$	0,0
$0,80 \leq I_b/R < 0,87$	2,0
$0,87 \leq I_b/R \leq 1,00$	4,0

2.3 As perdas de potência para as redes em SDMT são obtidas por meio da expressão a seguir:

$$\Delta p^{SDMT} = \frac{\left( p_{\max}^{SDMT} \right)^2 I_{\text{tot}}^{SDMT}}{m_p^{SDMT}} \left( \frac{v_b^{SDMT}}{v^{SDMT}} \right)^2 \left( \frac{\cos \varphi_b^{SDMT}}{\cos \varphi^{SDMT}} \right)^2 [kW] \quad (2)$$

Onde,

$\Delta p^{SDMT}$ : perdas de potência do SDMT [kW];

$p_{\max}^{SDMT}$ : potência máxima do SDMT [MW];

$I_{\text{tot}}^{SDMT}$ : comprimento total do SDMT [km];

$m_p^{SDMT}$ : momento de perdas do circuito do SDMT para os valores de referência ou de base [MW<sup>2</sup> km/kW];

$v_b^{SDMT}$ : tensão de referência do SDMT ou de base utilizada para a determinação do  $m_p$  [kV]. Para as constantes definidas nas Tabelas 2 a 4 desta Seção deve-se utilizar 13,8 kV;

$v^{SDMT}$ : tensão de operação do SDMT [kV];

$\varphi_b^{SDMT}$ : ângulo de referência do SDMT ou de base que corresponde ao fator de potência utilizado para a determinação de  $m_p$  [graus]. Para as constantes definidas nas Tabelas 2 a 4 desta Seção deve-se utilizar 18,2°;

$\varphi^{SDMT}$ : ângulo do fator de potência do SDMT [graus].

A lei geral do momento de perdas é definida como:

$$m_p^{SDMT} = \alpha (n_d)^\beta (n_p)^\gamma \left[ \frac{MW^2 km}{kW} \right] \quad (3)$$

Onde,

$n_d$ : 360/ $\theta$ ;

$\theta$ : ângulo do setor circular do circuito do SDMT [graus];

Assunto: Cálculo das Perdas Técnicas de	Seção: 7.2	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 12 de 22
--	---------------	---------------	---------------------------------	---------------------

$n_p$ : número de transformadores próprios e particulares conectados ao circuito do SDMT;

$$\alpha: a * (r_t + r_r)^b$$

$$\beta: c + (d * \ln(r_t / r_r))$$

$$\gamma: e$$

$r_t$ : resistência do condutor tronco do SDMT [ohm/km];

$r_r$ : resistência do condutor ramal do SDMT [ohm/km];

a, b, c, d, e: constantes definidas de acordo o valor de  $r_t$ ,  $r_r$  e da distância da carga equivalente  $d_{c_{eq}}$ .

- 2.3.1 Os parâmetros **a**, **b**, **c**, **d**, e **e** são constantes definidas de acordo os valores de resistências dos condutores tronco e ramal, representados respectivamente por  $r_t$  e  $r_r$ , além do expoente  $\sigma_x$  definido anteriormente. Os coeficientes podem ser obtidos pelas Tabelas 2, 3 e 4:

**Tabela 2** – Condição dada por  $r_t \leq 0,6910$  [ $\Omega$ ] e  $r_r \leq 0,6910$  [ $\Omega$ ].

Lei Geral Coeficiente	Expoente da função de distribuição de densidades				
	-1,0	-0,5	0,0	2,0	4,0
a	1.9727	1.5650	1.4323	1.1255	0.9811
b	-0.9031	-0.8611	-0.7889	-0.7692	-0.8362
c	-0.5377	-0.5255	-0.5127	-0.4877	-0.4626
d	-0.1464	-0.1425	-0.1362	-0.1231	-0.0993
e	0.4877	0.4815	0.4687	0.4457	0.4315

**Tabela 3** – Condição dada por  $r_t \geq 0,6910$  [ $\Omega$ ] e  $r_r > 0,6910$  [ $\Omega$ ].

Lei Geral Coeficiente	Expoente da função de distribuição de densidades				
	-1,0	-0,5	0,0	2,0	4,0
a	1.7445	1.4565	1.1739	0.8673	0.8512
b	-0.9310	-0.9796	-0.9020	-0.8297	-0.9085
c	-0.5278	-0.5208	-0.5108	-0.4751	-0.4688
d	-0.1366	-0.1351	-0.1348	-0.1061	-0.1011
e	0.4873	0.4768	0.4723	0.4481	0.4281

**Tabela 4** – Condição dada por  $r_t < 0,6910$  [ $\Omega$ ] e  $r_r > 0,6910$  [ $\Omega$ ].

Lei Geral Coeficiente	Expoente da função de distribuição de densidades				
	-1,0	-0,5	0,0	2,0	4,0
a	2.0766	1.6995	1.5101	1.2353	1.1345
b	-0.8332	-0.7886	-0.7597	-0.7490	-0.6975
c	-0.5896	-0.5661	-0.5613	-0.5342	-0.5118
d	-0.1961	-0.1786	-0.1735	-0.1558	-0.1412
e	0.4890	0.4787	0.4711	0.4468	0.4286

Assunto: Cálculo das Perdas Técnicas de	Seção: 7.2	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 13 de 22
--	---------------	---------------	---------------------------------	---------------------

2.3.2 As constantes apresentadas nas Tabelas 1, 2, 3 e 4 desta Seção foram definidas de acordo com a seguinte metodologia:

- Inicialmente foram gerados alimentadores arborescentes tomando como base um determinado conjunto de variáveis de entrada, a saber:  $rr$ ,  $rt$ ,  $\sigma$ ,  $n_p$ ,  $\theta$  e  $R$ , conforme definidos anteriormente;
- São sorteados pontos de carga, considerando a densidade de carga  $\sigma$ , dentro de um setor circular definido por  $\theta$  e  $R$ ;
- À medida que vão sendo sorteados, os pontos são conectados a rede existente por meio do segmento de menor comprimento;
- Ao final de cada sessão se dispõe de uma matriz topológica, a partir da qual se pode montar uma rede modelo;
- A partir da rede modelo são calculadas as perdas na condição de carga máxima;
- As constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e  $e$  são ajustadas, pelo método dos mínimos quadrados.

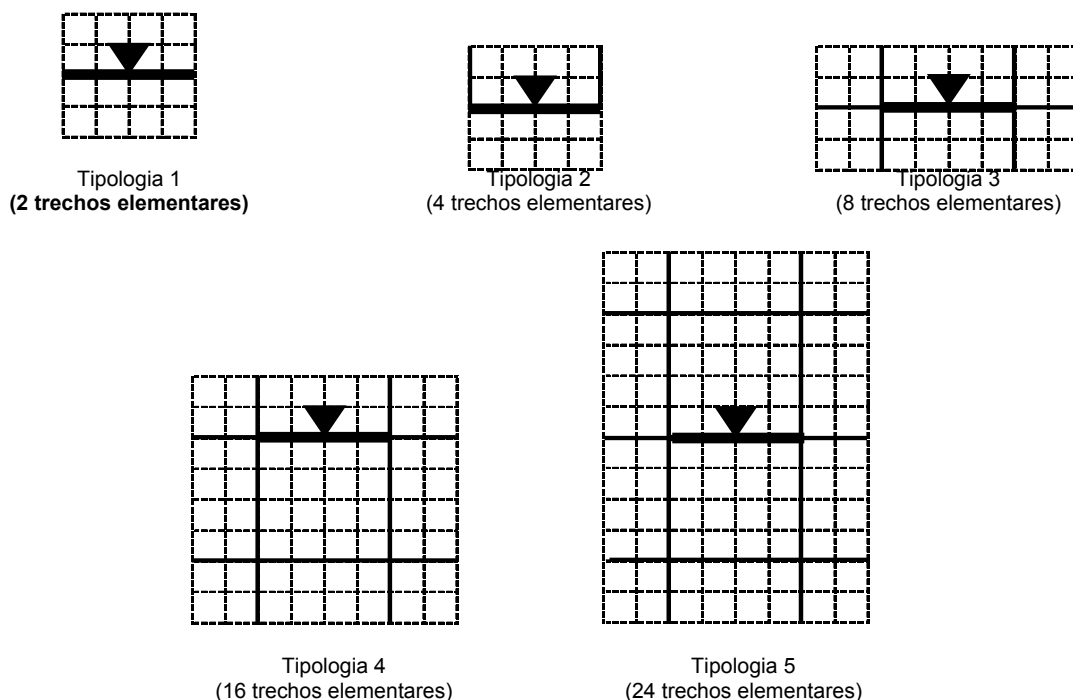
2.3.3 Os valores utilizados como parâmetros de entrada são apresentados no Anexo II deste procedimento.

### **3 PERDAS DE POTÊNCIA EM SDBT**

3.1 Para o SDBT são consideradas 5 tipologias de rede, conforme Figura 1 desta Seção, com distribuição de carga uniforme, e modelo de carga constante com relação à tensão, conforme Figura 2 desta Seção.

3.2 Cada rede deve estar vinculada a um transformador, juntamente com sua potência nominal e respectivo fator de utilização.

Assunto: Cálculo das Perdas Técnicas de	Seção: 7.2	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 14 de 22
--	---------------	---------------	---------------------------------	---------------------

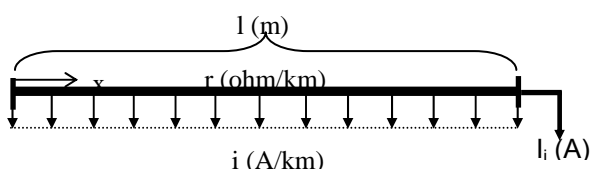


**Figura 1** – Tipologias de redes de baixa tensão

- 3.3 Para um trecho elementar, as perdas de potência correspondem à seguinte expressão:

$$\Delta p_{SDBT} = f(r, l, i, I_j) = \int_{x=0}^l r(ix + I_j)^2 dx = r \times \left( \frac{i^2 \times l^2}{3} + i \times I_j \times l + I_j^2 \right) \times 10^{-6} [MW] \quad (4)$$

Onde, os parâmetros são apresentados no modelo de trecho de rede elementar da Figura 2:



**Figura 2** – Trecho de rede elementar.

Onde:

$\Delta p_{SDBT}$  : perdas de potência do circuito SDBT em [MW];

$l$ : comprimento do trecho elementar, dado pelo comprimento total do circuito dividido pelo número de trechos elementares referente à respectiva tipologia [km];

Assunto: Cálculo das Perdas Técnicas de	Seção: 7.2	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 15 de 22
--	---------------	---------------	---------------------------------	---------------------

$r$ : resistência por unidade de comprimento [ $\Omega/\text{km}$ ];  
 $I_j$ : corrente total a jusante do trecho elementar [A];  
 $i$ : densidade de corrente, dado pela corrente máxima do circuito dividido por seu comprimento total [A/km];

#### 4 PERDAS DE POTÊNCIA EM UNIDADES TRANSFORMADORAS

4.1 As perdas de potência dos transformadores são calculadas de acordo com a expressão a seguir:

$$\Delta p_{TR} = \sum_{t=1}^{nt} \left( \Delta p_{fe}^t + (f_U^t)^2 \times \Delta p_{cu}^t \right) \times 10^{-3} [\text{MW}] \quad (5)$$

Onde,

$\Delta p_{TR}$ : perdas de potência do transformador em [MW];

$\Delta p_{fe}^t$ : perdas no ferro ou a vazio do transformador  $t$  [kW];

$\Delta p_{cu}^t$ : perdas no cobre do transformador  $t$  na condição nominal de carga, podendo ser obtido pela diferença entre as perdas totais e a vazio [kW];

$nt$ : número total de transformadores.

$f_U^t$ : fator de utilização do transformador  $t$ .

#### 5 PERDAS DE POTÊNCIA EM RAMAIS DE LIGAÇÃO E MEDIDORES

5.1 Perdas de potência em ramais de ligação

5.1.1 Considerando a resistência média  $R$  do condutor do ramal de ligação, as perdas totais de potência, são dadas pela expressão a seguir:

$$\Delta p_R = R \left( \frac{I_f}{F_d} \right)^2 \times (3N_{UC3} + 3N_{UC2} + 2N_{UC1}) \times 10^{-6} [\text{MW}] \quad (6)$$

Onde:

$\Delta p_R$  = perdas de potência dos ramais em [MW];

$R$ : resistência média dos condutores dos ramais de ligação [ $\Omega$ ];

$F_d$ : Fator de diversidade, cujo valor será fixado em 0,7;

$I_f$ : corrente de fase (A), dado por:

$$i_f = \frac{E_{\text{form}}^B \times 10^6}{\text{FC}_{\text{SDBT}} \cdot \cos\Phi (3N_{UC}^3 V_F^{3f} + 2N_{UC}^2 V_F^{2f} + 2N_{UC}^2 V_F^{2f1} + N_{UC}^1 V_F^{1f}) \times 8760} \quad (7)$$

Assunto: Cálculo das Perdas Técnicas de	Seção: 7.2	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 16 de 22
--	---------------	---------------	---------------------------------	---------------------

Onde:

$E_{for}^B$ : total de energia consumida pelas unidades consumidoras do grupo B (MWh);

$\cos \Phi$ : 0,92, fator de potência de referência;

$N_{UC3}$ : número de unidades consumidoras alimentadas em 3 fases e 4 fios;

$N_{UC2}$ : número de unidades consumidoras alimentadas em 2 fases e 3 fios;

$N_{UC2'}$ : número de unidades consumidoras alimentadas em 1 fase e 3 fios;

$N_{UC1}$ : número de unidades consumidoras alimentadas em 1 fase e 2 fios;

$VF^{3f}$ : tensão de fase das unidades consumidoras alimentadas em 3 fases e 4 fios;

$VF^{2f}$ : tensão de fase das unidades consumidoras alimentadas em 2 fases e 3 fios;

$VF^{2f'}$ : tensão de fase das unidades consumidoras alimentadas em 1 fase e 3 fios;

$VF^{1f}$ : tensão de fase das unidades consumidoras alimentadas em 1 fase e 2 fios.

$FC_{SDBT}$ : Fator de carga típico para consumidores do SDBT.

## 5.2 Perdas de potência nos medidores

5.2.1 Para os medidores são computadas as perdas nas bobinas de tensão localizadas nas unidades consumidoras do grupo B. São considerados 1 W de perda por circuito de tensão para medidores eletromecânicos e 0,5 W para medidores eletrônicos, que deve ser multiplicada pelo número de medidores do parque de medição da distribuidora para unidades consumidoras do grupo B, conforme expressão a seguir:

$$\Delta p_M = P_C \times (3 \times NUC_3 + 2 \times NUC_2 + 2 \times NUC_2' + NUC_1) \times 10^{-3} [kW] \quad (8)$$

Onde,

$\Delta p_M$ : perdas de potência nos medidores em [kW];

$P_C$ : perda por circuito de tensão do medidor em [W];

$N_{UC3}$ : número de unidades consumidoras alimentadas em 3 fases e 4 fios;

$N_{UC2}$ : número de unidades consumidoras alimentadas em 2 fases e 3 fios;

$N_{UC2'}$ : número de unidades consumidoras alimentadas em 1 fase e 3 fios;

$N_{UC1}$ : número de unidades consumidoras alimentadas em 1 fase e 2 fios;



Assunto: Cálculo das Perdas Técnicas de Energia	Seção: 7.3	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 17 de 22
--	---------------	---------------	---------------------------------	---------------------

## **SEÇÃO 7.3 – CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS DE ENERGIA**

### **1 OBJETIVOS**

- 1.1 Estabelecer a metodologia para a apuração das perdas de energia dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

### **2 PERDAS DE ENERGIA EM SDAT**

- 2.1 As perdas de energia do SDAT são obtidas, preferencialmente, dos dados dos sistemas de medição, devendo ser apuradas discriminadamente para os subgrupos A1, A2 e A3.
- 2.2 A distribuidora deve segregar as perdas dos transformadores e das redes, nos casos onde as perdas medidas incluam as perdas desses equipamentos, conforme o modelo de cálculo de perdas de transformadores apresentado neste Módulo.
- 2.3 O adicional de perdas técnicas de que trata o item 3.2.7 da Seção 7.1 não será aplicado às perdas apuradas por medição.
- 2.4 As perdas de energia do SDAT só devem ser apuradas por medição quando existem medições em todas as fronteiras do nível de tensão correspondente aos subgrupos A1, A2 e A3. Caso não haja possibilidade de apuração das perdas por medição para um sistema ou parte do sistema da distribuidora, deverá ser realizado estudo com fluxo de carga, considerando a sazonalidade das cargas.

### **3 PERDAS DE ENERGIA EM SDMT**

- 3.1 As perdas de energia variam de acordo com o carregamento (curva de carga) da rede ou equipamento. Assim, como demonstrado na Seção 7.2 deste Módulo, o cálculo das perdas técnicas de potência é realizado na condição de carga máxima. Para o cálculo das perdas de energia é necessário utilizar o fator de perdas, que estabelece a relação entre a perda de potência média e a de potência para a condição de carga máxima.
- 3.2 As perdas técnicas de energia das redes SDMT -  $\Delta E_{SDMT}$  podem ser obtidas pela multiplicação entre as perdas de potência -  $\Delta P_{SDMT}$ , fator de perdas do SDMT -  $Fpe_{SDMT}$  e período de tempo analisado, conforme expressão a seguir:

$$\Delta E_{SDMT} = \Delta P_{SDMT} \times Fpe_{SDMT} \times 8760 [MWh / ano] \quad (1)$$

Assunto: Cálculo das Perdas Técnicas de Energia	Seção: 7.3	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 18 de 22
--	---------------	---------------	---------------------------------	---------------------

#### 4 PERDAS DE ENERGIA EM SDBT

- 4.1 As perdas técnicas de energia das redes SDBT –  $\Delta E_{SDBT}$  podem ser obtidas pela multiplicação entre as perdas de potência –  $\Delta P_{SDBT}$ , fator de perdas médio do SDBT –  $Fpe_{SDBT}$  e período de tempo analisado, conforme expressão a seguir:

$$\Delta E_{SDBT} = \Delta P_{SDBT} \times Fpe_{SDBT} \times 8760 [MWh/ano] \quad (2)$$

#### 5 PERDAS DE ENERGIA EM UNIDADES TRANSFORMADORAS

- 5.1 As perdas de energia para as unidades transformadoras são obtidas pela multiplicação das perdas a vazio pelo período de tempo analisado, somado às perdas de potência no cobre multiplicadas pelo fator de perdas médio da transformação tipo  $k$  e seu período de análise, conforme definido na expressão a seguir:

$$\Delta E_T = 8760 \times \sum_{t=1}^{nt} (\Delta p_{fe}^t + \Delta p_{cu}^t \times Fpe_{TR}) [MWh] \quad (3)$$

#### 6 PERDAS DE ENERGIA EM RAMAIS DE LIGAÇÃO E MEDIDORES

- 6.1 As perdas de energia para os ramais de ligação e medidores –  $\Delta E_{RM}$  são obtidas pela multiplicação entre as respectivas perdas de potência do ramal –  $\Delta P_R$ , fator de perdas –  $Fpe_{SDBT}$  e período de tempo analisado, somado as perdas de potência nos medidores –  $\Delta P_M$  multiplicadas pelo período de tempo analisado, conforme definido na expressão a seguir:

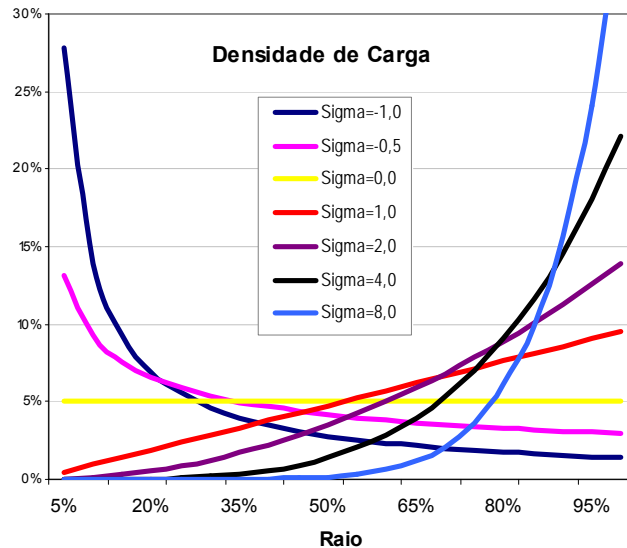
$$\Delta E_R = (\Delta P_R \times Fpe_R + \Delta P_M) \times 8760 [MWh] \quad (4)$$

Assunto: Cálculo da Densidade de Carga por Meio da Distância de Carga Equivalente	Seção: Anexo I	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 19 de 22
--	-------------------	---------------	---------------------------------	---------------------

**ANEXO I – CÁLCULO DA DENSIDADE DE CARGA POR MEIO DA DISTÂNCIA DE CARGA EQUIVALENTE**

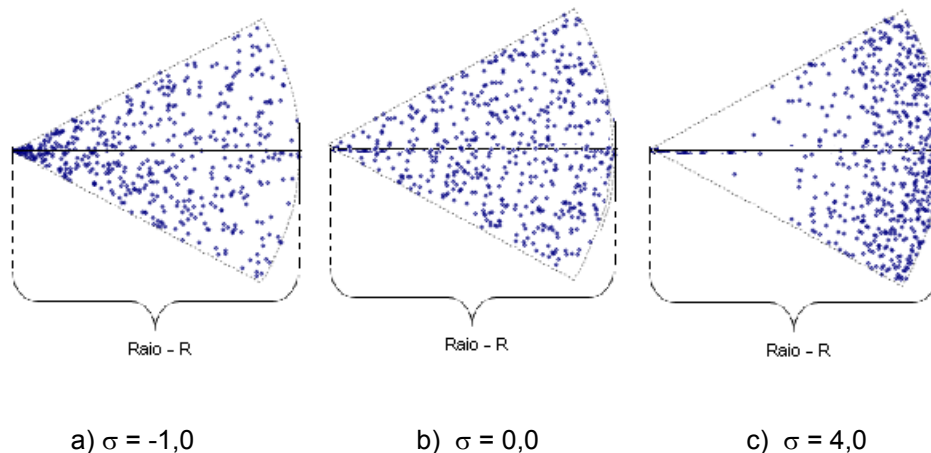
O modelo de árvore arborescente pressupõe a distribuição de carga a partir da subestação de distribuição por meio de um coeficiente  $\sigma$  de densidade de carga, definido como:

$$d = d_0 r^\sigma \tag{1}$$



**Figura 1** – Perfis de densidade de carga ao longo do raio do setor circular, para diferentes valores do coeficiente de densidade de carga.

A Figura 2 deste anexo ilustra três casos de densidade de carga (-1,0, 0,0 e 4,0), para um ângulo de ação de 60° e 500 pontos de carga.

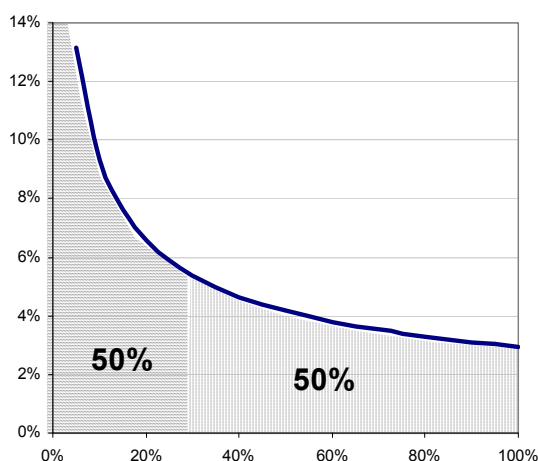


**Figura 2** – Casos com diferentes densidades de carga

Assunto: Cálculo da Densidade de Carga por Meio da Distância de Carga Equivalente	Seção: Anexo I	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 20 de 22
--	-------------------	---------------	---------------------------------	---------------------

Para a apuração do expoente  $\sigma$  a partir dos dados disponíveis na distribuidora, pode-se utilizar o parâmetro distância da carga equivalente com relação à saída do circuito da subestação ( $dc_{eq}$ ). A distância equivalente da carga, a partir da Equação 1 se dá pela seguinte equação, conforme ilustrado na Figura 3:

$$dc_{eq} = \frac{\int_{r=0}^{l_b} (d(r) \times \theta r) dr}{\int_{r=0}^{l_b} (d(r) \times \theta r) dr} = 0,5 \quad (2)$$



**Figura 3** – Distância equivalente da carga do setor circular para  $\sigma = -0,5$ .

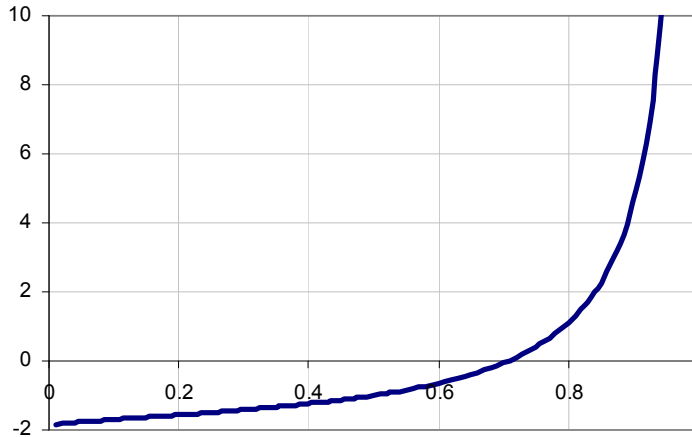
O desenvolvimento da Equação 2 resulta em:

$$dc_{eq} = R \times 0,5^{1/\sigma+2} \quad (3)$$

Da qual leva à seguinte equação inversa, ilustrada na Figura 4:

$$\sigma = \frac{\log 0,5}{\log \frac{dc_{eq}}{R}} - 2 \quad (4)$$

Assunto: Cálculo da Densidade de Carga por Meio da Distância de Carga Equivalente	Seção: Anexo I	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 21 de 22
--	-------------------	---------------	---------------------------------	---------------------

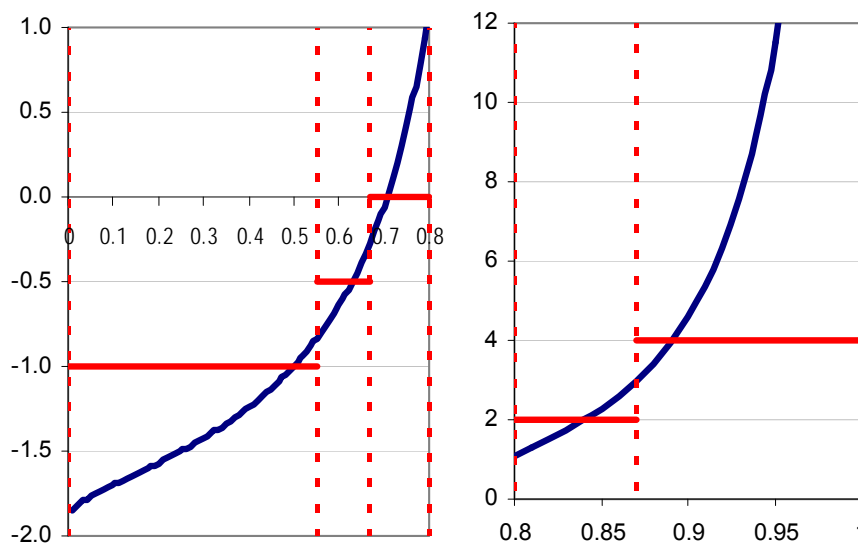


**Figura 4** – Variação do expoente  $\sigma$  em função da distância da carga equivalente ( $dc_{eq}/R$ )

Na prática, são aplicadas cinco formulações de perdas, em função do expoente  $\sigma$ : -1.0, -0.5, 0.0, 1.0 e 4.0. Sendo assim, estipulam-se cinco intervalos da relação  $dc_{eq}/R$ , ilustrados na Figura 5:

**Tabela 1** – Avaliação do expoente  $\sigma$  em função de  $dc_{eq}/R$

Intervalo de $dc_{eq}/R$	Expoente $\sigma$
0,00 a 0,55	-1,0
0,55 a 0,67	-0,5
0,67 a 0,80	0,0
0,80 a 0,87	2,0
0,87 a 1,00	4,0



**Figura 5** – Avaliação do expoente  $\sigma$  em função de  $dc_{eq}/R$

Assunto: Lei Geral de Perdas para SDMT	Seção: Anexo II	Revisão: 1	Data de Vigência: 01/01/2010	Página: 22 de 22
---	--------------------	---------------	---------------------------------	---------------------

## ANEXO II – LEI GERAL DE PERDAS PARA SDMT

Neste item apresentamos os dados utilizados para gerar as Tabelas 2, 3 e 4 da Seção 7.2. A Tabela 1 deste anexo apresenta a combinação de cabos utilizados respectivamente no tronco e nos ramais.

**Tabela 1** – Combinação de cabos utilizados respectivamente no tronco e nos ramais.

Caso	Cabo Tronco	Cabo Ramal
I	336.4-CA	4/0-CA
	336.4-CA	1/0-CA
	4/0-CA	1/0-CA
II	1/0-CA	4-CA
	1/0-CA	A02
	A02	4-CA
III	336.4-CA	2-CA
	336.4-CA	4-CA
	4/0-CA	2-CA
	4/0-CA	4-CA

Adicionalmente, foram considerados cinco patamares do coeficiente da função de distribuição de densidades, que são bastante representativas, já que a aferição deste coeficiente precede uma difícil e nem sempre precisa avaliação. Os valores considerados foram -1, -1/2, 0, 2 e 4.