

## **Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL**

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

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

<b>Revisão</b>	<b>Motivo da Revisão</b>	<b>Data e Instrumento de Aprovação pela ANEEL</b>
0	Primeira versão aprovada	16 / 12 / 2008 Resolução nº 345 / 2008

---

## 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>SEÇÃO 7.1 – PREMISSAS DE CÁLCULO E INDICADORES .....</b>	<b>4</b>
<b>1 OBJETIVO .....</b>	<b>4</b>
<b>2 PREMISSAS DE CÁLCULO .....</b>	<b>4</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>5</b>
<b>4 INDICADORES DE PERDAS .....</b>	<b>6</b>
<b>5 DADOS E INFORMAÇÕES A SEREM FORNECIDAS PARA O CÁLCULO DAS PERDAS .....</b>	<b>7</b>
<b>SEÇÃO 7.2 – CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS DE POTÊNCIA .....</b>	<b>9</b>
<b>1 OBJETIVO .....</b>	<b>9</b>
<b>2 PERDAS DE POTÊNCIA EM SDMT .....</b>	<b>9</b>
<b>3 PERDAS DE POTÊNCIA EM SDBT.....</b>	<b>12</b>
<b>4 PERDAS DE POTÊNCIA EM UNIDADES TRANSFORMADORAS .....</b>	<b>14</b>
<b>5 PERDAS DE POTÊNCIA EM RAMAIS DE LIGAÇÃO E MEDIDORES.....</b>	<b>14</b>
<b>SEÇÃO 7.3 – CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS DE ENERGIA .....</b>	<b>16</b>
<b>1 OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
<b>2 PERDAS DE ENERGIA EM SDAT .....</b>	<b>16</b>
<b>3 PERDAS DE ENERGIA EM SDMT .....</b>	<b>16</b>
<b>4 PERDAS DE ENERGIA EM SDBT.....</b>	<b>17</b>
<b>5 PERDAS DE ENERGIA EM UNIDADES TRANSFORMADORAS .....</b>	<b>17</b>
<b>6 PERDAS DE ENERGIA EM RAMAIS DE LIGAÇÃO E MEDIDORES.....</b>	<b>17</b>
<b>ANEXO I – CÁLCULO DA DENSIDADE DE CARGA POR MEIO DA DISTÂNCIA DE CARGA EQUIVALENTE .....</b>	<b>18</b>
<b>ANEXO II – LEI GERAL DE PERDAS PARA SDMT .....</b>	<b>21</b>

---

Assunto: Introdução	Seção: 7.0	Revisão: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 3 de 21
------------------------	---------------	---------------	-------------------------------------	--------------------

## **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 somada 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: Premissas de Cálculo e Indicadores	Seção: 7.1	Revisão: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 4 de 21
--	---------------	---------------	-------------------------------------	--------------------

## **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 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.

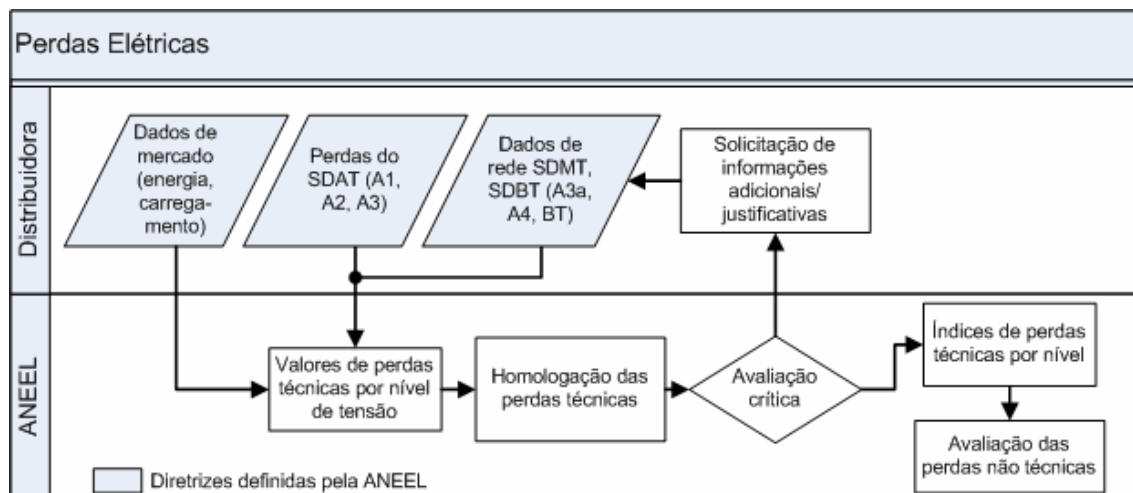
Assunto: Premissas de Cálculo e Indicadores	Seção: 7.1	Revisão: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 5 de 21
--	---------------	---------------	-------------------------------------	--------------------

### 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.

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.

Assunto: Premissas de Cálculo e Indicadores	Seção: 7.1	Revisão: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 6 de 21
--	---------------	---------------	-------------------------------------	--------------------

- 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), para um período anual, estratificando os valores para cada segmento, conforme os indicadores a seguir definidos:

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);

Assunto: Premissas de Cálculo e Indicadores	Seção: 7.1	Revisão: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 7 de 21
--	---------------	---------------	-------------------------------------	--------------------

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:

$$PPNT = PPD - PPT[\%] \quad (4)$$

## **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 no período de 12 meses completos imediatamente anteriores à data de envio dos dados à ANEEL.

Assunto: Premissas de Cálculo e Indicadores	Seção: 7.1	Revisão: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 8 de 21
--	---------------	---------------	-------------------------------------	--------------------

- 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: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 9 de 21
--	---------------	---------------	-------------------------------------	--------------------

## 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:

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

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;  
 $S_{nom_i}$ : 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: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 10 de 21
--	---------------	---------------	-------------------------------------	---------------------

**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 [ $MW^2 \text{ km/kW}$ ];

$v_b^{SDMT}$ : 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: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 11 de 21
--	---------------	---------------	-------------------------------------	---------------------

$n_p$ : 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	Expoentes 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: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 12 de 21
--	---------------	---------------	-------------------------------------	---------------------

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

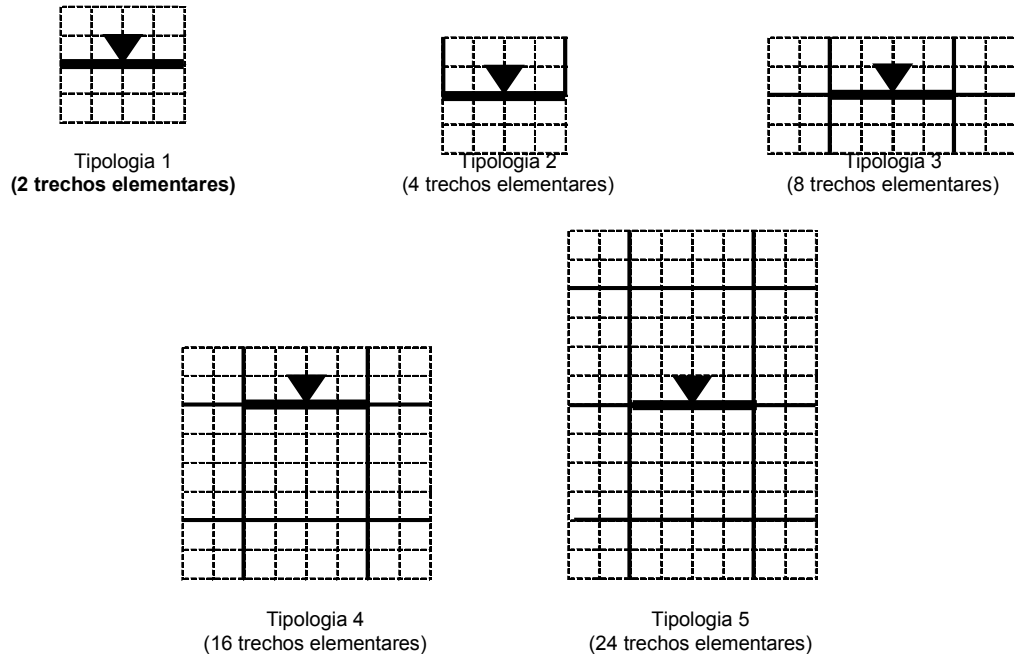
- Inicialmente foram gerados alimentadores arborescentes tomando como base um determinado conjunto de variáveis de entrada, a saber:  $rr$ ,  $rt$ ,  $\sigma$ ,  $n_p$ ,  $\theta$  e  $R$ , conforme definidos anteriormente;
- São sorteados pontos de carga, considerando a densidade de carga  $\sigma$ , 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: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 13 de 21
--	---------------	---------------	-------------------------------------	---------------------

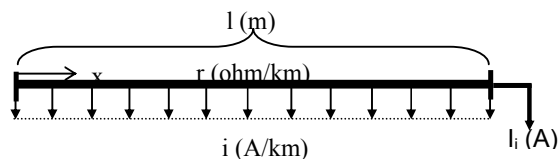


**Figura 1** – Tipologias de redes de baixa tensão

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: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 14 de 21
--	---------------	---------------	-------------------------------------	---------------------

*r*: resistência por unidade de comprimento [ $\Omega/\text{km}$ ];  
*lj*: 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:

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

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:

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

Onde:

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

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

**F<sub>d</sub>**: Fator de diversidade, cujo valor será fixado em 0,7;

**I<sub>f</sub>**: corrente de fase (A), dado por:

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

Assunto: Cálculo das Perdas Técnicas de	Seção: 7.2	Revisão: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 15 de 21
--	---------------	---------------	-------------------------------------	---------------------

Onde:

$E_{form}^B$ : 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;

$N_{UC1}$ : 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 1,2 W de perdas por bobina de tensão, que deve ser multiplicada pelo número de bobinas disponíveis no parque de medição da distribuidora para unidades consumidoras do grupo B, conforme expressão a seguir:

$$\Delta p_M = 1,2 \times (3 \times NUC_3 + 2 \times NUC_2 + NUC_1) \times 10^{-3} [kW] \quad (8)$$

Onde,

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

$N_{UC3}$ : 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: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 16 de 21
--	---------------	---------------	-------------------------------------	---------------------

## 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 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: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 17 de 21
--	---------------	---------------	-------------------------------------	---------------------

#### 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:

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

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

- 6.1 As perdas de energia para os ramos 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:

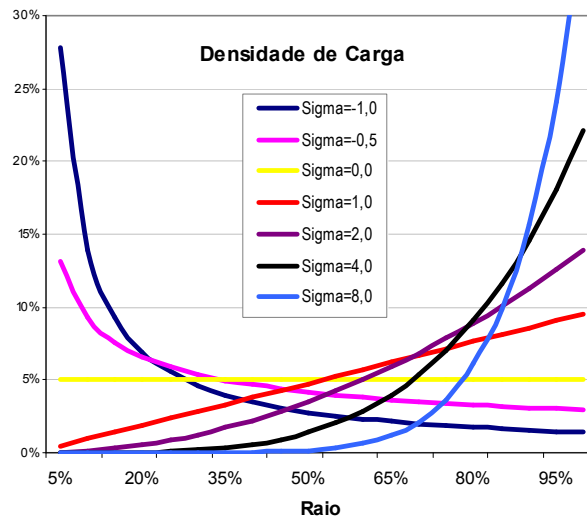
$$\Delta E_R = (\Delta P_R \times Fpe_R + \Delta P_M) \times 8760 [MWh] \quad (4)$$

Assunto: Cálculo da Densidade de Carga por Meio da Distância de Carga Equivalente	Seção: Anexo I	Revisão: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 18 de 21
--	-------------------	---------------	-------------------------------------	---------------------

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

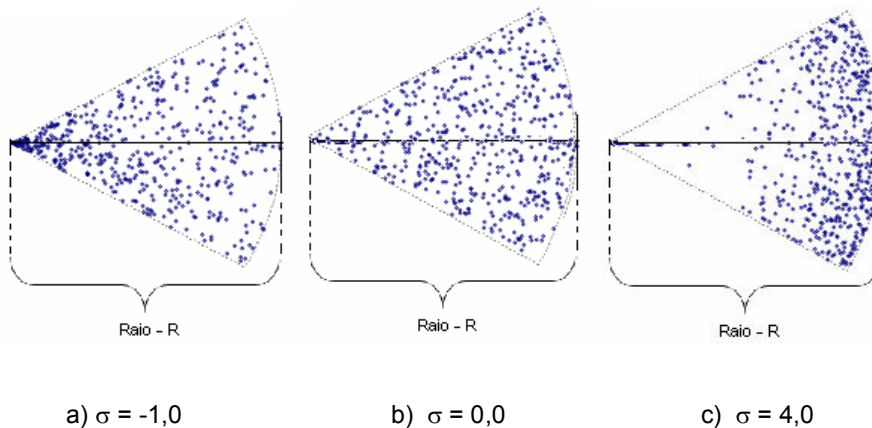
O modelo de árvore arborescente pressupõe a distribuição de carga a partir da subestação de distribuição por meio de um coeficiente  $\sigma$  de densidade de carga, definido como:

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



**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: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 19 de 21
--	-------------------	---------------	-------------------------------------	---------------------

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:

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

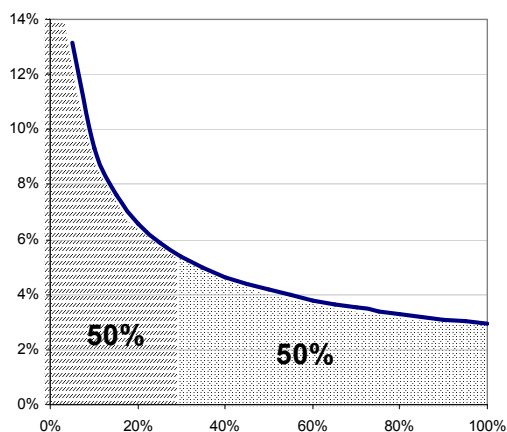


Figura 3 – Distância equivalente da carga do setor circular para  $\sigma = -0,5$ .

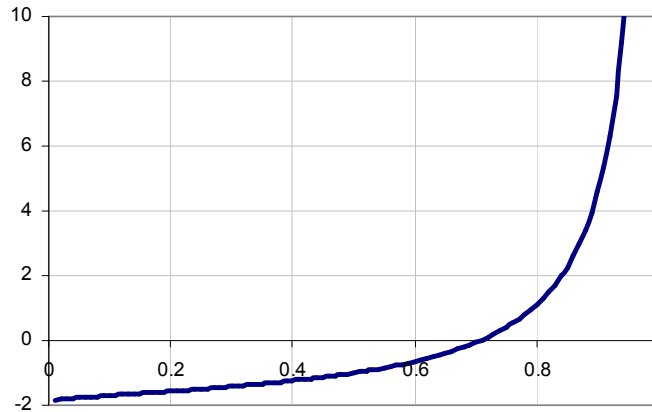
O desenvolvimento da Equação 2 resulta em:

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

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: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 20 de 21
--	-------------------	---------------	-------------------------------------	---------------------

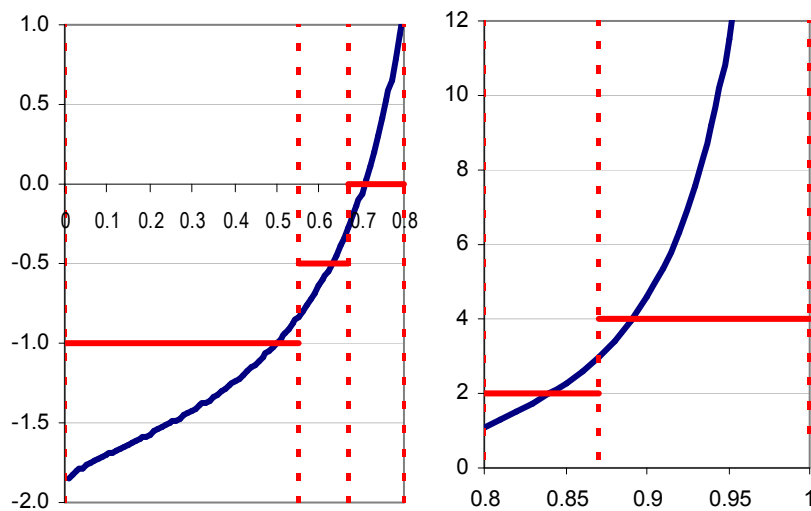


**Figura 4** – Variação do expoente  $\sigma$  em função da distância da carga equivalente ( $dc_{eq}/R$ )

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: Geração Distribuída	Seção: Anexo II	Revisão: 0	Data de Vigência: 31 / 12 / 2008	Página: 21 de 21
---------------------------------	--------------------	---------------	-------------------------------------	---------------------

## 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.