

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL

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

Módulo 7– Perdas Técnicas Regulatórias

Revisão	Motivo da Revisão	Data de Aprovação pela ANEEL	Data e Instrumento de Aprovação pela ANEEL
0	Atualização SRD	<u>xx</u> / <u>xx</u> /2007	Resolução nº <u>__</u> / <u>__</u> <u>xx</u> / <u>xx</u> /2007

Documento:

Rev.: 0

Data: 27/08/2007

MÓDULO 7 – PERDAS TÉCNICAS REGULATÓRIAS

ÍNDICE

SEÇÃO 7.0 – INTRODUÇÃO	3
1 OBJETIVO	3
2 ABRANGÊNCIA	3
3 CONTEÚDO	3
SEÇÃO 7.1 – PREMISSAS DE CÁLCULO E INDICADORES	4
1 OBJETIVO	4
2. PREMISSAS DE CÁLCULO	4
3. METODOLOGIA	5
4. VALORES E INDICADORES DE PERDAS TÉCNICAS	6
5. DADOS E INFORMAÇÕES A SEREM FORNECIDAS PARA O CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS	8
SEÇÃO 7.2 – METODOLOGIA DE CÁLCULO DE PERDAS TÉCNICAS DE DEMANDA	9
1 OBJETIVO	9
2. PERDAS TÉCNICAS DE DEMANDA EM SDAT	9
3. PERDAS DE DEMANDA EM SDMT	9
4 PERDAS DE DEMANDA EM SDBT	13
5 PERDAS DE DEMANDA NOS TRANSFORMADORES	14
6 PERDAS DE DEMANDA EM RAMAIS E MEDIDORES	15
SEÇÃO 7.3 – CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS DE ENERGIA	17
1 OBJETIVOS	17
2 PERDAS DE ENERGIA EM SDAT	17
3 PERDAS DE ENERGIA EM SDMT	17
4 PERDAS DE ENERGIA EM SDBT	17
5 PERDAS DE ENERGIA EM UNIDADES TRANSFORMADORAS	18
6. PERDAS DE ENERGIA NOS RAMAIS DE LIGAÇÃO E MEDIDORES	18
ANEXO I – CÁLCULO DA DENSIDADE DE CARGA POR MEIO DA DISTÂNCIA DE CARGA EQUIVALENTE	19
ANEXO II – LEI GERAL DE PERDAS PARA SDMT	22
ANEXO III – GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	23

Assunto: Introdução	Seção: 7.0	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 3 de 26
------------------------	---------------	---------------	--------------------------	--------------------

SEÇÃO 7.0 – INTRODUÇÃO

1 OBJETIVO

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

2 ABRANGÊNCIA

- 2.1 São apuradas e avaliadas a cada revisão tarifária ou quando requeridas especificamente pela ANEEL as perdas técnicas decorrentes da energia elétrica entregue às unidades consumidoras (incluídos os consumidores livres), as outras distribuidoras e ao consumo próprio.
- 2.2 As perdas não técnicas pela são determinadas 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 E CÁLCULO DE INDICADORES** - define a terminologia, caracteriza os fenômenos e estabelece os parâmetros de referência relativos às perdas técnicas de energia e demanda;
 - c) seção 7.2 – **METODOLOGIA DE CÁLCULO DE PERDAS TÉCNICAS DE DEMANDA** - estabelece os procedimentos relativos ao cálculo das perdas técnicas de demanda para os sistemas de distribuição de energia elétrica;
 - d) seção 7.3 – **METODOLOGIA DE CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS DE ENERGIA** - estabelece os procedimentos relativos ao cálculo das perdas técnicas de energia para os sistemas de distribuição de energia elétrica;

Assunto: Premissas de Cálculo e Indicadores	Seção: 7.1	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 4 de 26
--	---------------	---------------	--------------------------	--------------------

SEÇÃO 7.1 – PREMISSAS DE CÁLCULO E INDICADORES

1 OBJETIVO

- 1.1 Definir e caracterizar os indicadores de perdas técnicas e especificar os dados necessários para os cálculos por segmento de distribuição.
- 1.2 As definições relativas às perdas técnicas estão na seção 1.2 – Glossário de Termos Técnicos do PRODIST.

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 pela legislação. 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 de MT e AT.
- 2.3 Serão consideradas perdas adicionais, de 15% sobre o montante de perdas técnicas calculadas para redes de BT, 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 em regime permanente estabelecidos no Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.
- 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 efeito 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 técnicas.
- 2.8 Os dados necessários para a apuração das perdas técnicas devem ser fornecidos pela distribuidora, conforme estabelecido no Módulo 6 – Informações Requeridas e Obrigações. Para a apuração das perdas ainda podem ser utilizadas informações disponíveis na ANEEL, tais como dados dos processos de revisão tarifária, do sistema de monitoramento de mercado, das definições de indicadores de qualidade, etc.

Assunto: Premissas de Cálculo e Indicadores	Seção: 7.1	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 5 de 26
--	---------------	---------------	--------------------------	--------------------

- 2.9 São consideradas as curvas de carga da campanha de medição, conforme Módulo 2.
- 2.10 A distribuidora deve apresentar avaliação das perdas não técnicas por nível de tensão, apresentando a metodologia utilizada no estudo.

3. METODOLOGIA

3.1 Procedimento de avaliação

- 3.1.1 A metodologia proposta busca estabelecer o procedimento a ser observado na apuração do montante de perdas globais e técnicas do sistema de distribuição.
- 3.1.2 O fluxograma da figura 1 desta seção descreve o procedimento para o cálculo das perdas técnicas. Consiste na definição das diretrizes a serem obedecidas na apuração dos dados necessários e no estabelecimento da metodologia de cálculo das perdas técnicas.
- 3.1.3 Na definição das perdas técnicas a ANEEL poderá considerar especificidades regionais.

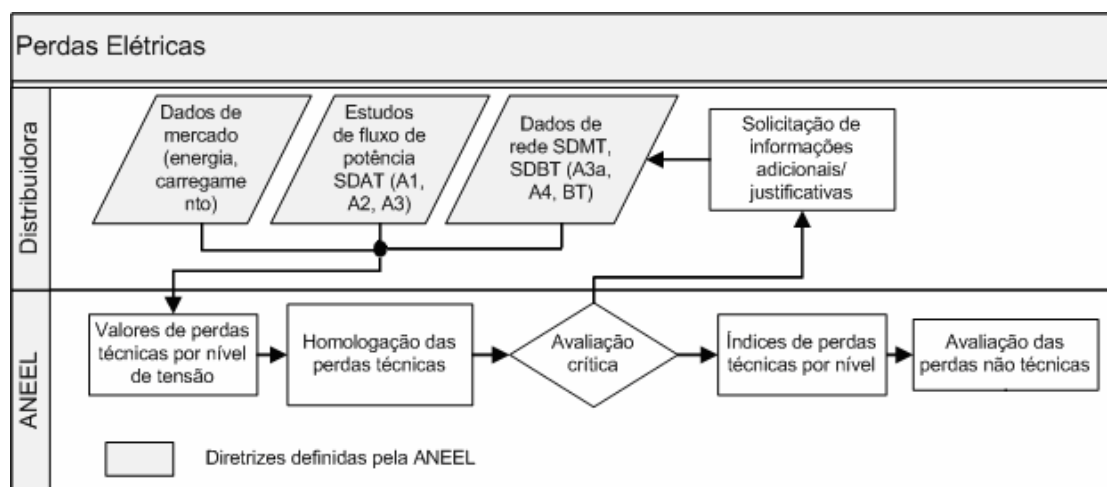


Figura 1- Fluxograma simplificado do procedimento de avaliação das perdas técnicas.

3.2 Procedimento de cálculo

- 3.2.1 O cálculo das perdas técnicas é realizado para cada nível de tensão de operação da distribuidora.
- 3.2.2 Com base nas características das redes, as perdas de energia dos sistemas de distribuição em alta tensão (SDAT) são avaliadas considerando os dados do balanço de energia, suportados pelos resultados dos estudos de fluxo de carga.

Assunto: Premissas de Cálculo e Indicadores	Seção: 7.1	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 6 de 26
--	---------------	---------------	--------------------------	--------------------

- 3.2.3 Excetuando-se o SDAT, a metodologia consiste na obtenção das perdas de demanda e o posterior cálculo das perdas de energia para cada nível de tensão, mediante a apuração do fator de perdas.
- 3.2.4 As perdas de demanda nos transformadores devem ser calculadas a partir dos valores estabelecidos de perdas a vazio e totais, considerando o valor declarado do fator de utilização, para cada equipamento/agrupamento informado pela distribuidora.
- 3.2.5 As perdas de demanda nas redes dos sistemas de distribuição em média tensão (SDMT) são avaliadas com base no "modelo arborescente", cuja tipologia de rede é definida dentro de um setor circular. Para cada rede, é aplicada a formulação matemática das perdas, a partir dos seus dados descritores.
- 3.2.6 As perdas de demanda nos sistemas de distribuição em baixa tensão (SDBT) são avaliadas pelo estabelecimento de redes típicas.
- 3.2.7 Será adotado um valor de 5% sobre o montante de perdas técnicas totais, devido à 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 deverá ser anual.
- 3.2.9 Os procedimentos a serem aplicados quando da avaliação das perdas técnicas de demanda e energia são apresentados nas seções 7.2 e 7.3, respectivamente.

4. VALORES E INDICADORES DE PERDAS TÉCNICAS

- 4.1 A ANEEL apurará os valores de perdas técnicas totais em megawatt-hora (MWh), para um período anual, estratificando os valores para cada nível de tensão e relação de transformação, conforme os indicadores a seguir definidos:

Assunto: Premissas de Cálculo e Indicadores	Seção: 7.1	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 7 de 26
--	---------------	---------------	--------------------------	--------------------

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

Energia ativa injetada – EI: energia efetivamente recebida e medida por um agente supridor, em megawatt-hora (MWh);

Energia injetada nas redes por nível de tensão - EID(i): total de energia ativa injetada nas instalações de distribuição, para cada nível de tensão (i), em megawatt-hora (MWh);

Energia Injetada nas transformações - EPT(j): total de energia ativa injetada nos enrolamentos primários dos transformadores, para cada relação de transformação de tensão (j), em megawatt-hora (MWh);

Perdas técnicas das instalações de distribuição - PTD(i): Perdas técnicas das instalações de distribuição, excluindo os transformadores, para cada nível de tensão, em megawatt-hora (MWh);

Perdas técnicas dos transformadores - PTT(j): Perdas técnicas dos transformadores das instalações de distribuição, para cada relação de transformação de tensão, em megawatt-hora (MWh);

Perdas Técnicas - PT: Corresponde à soma das perdas técnicas de todos os níveis de tensão e de todas as relações de transformação, em megawatt-hora (MWh):

$$PT = PTT + PTD \quad (1)$$

Sendo que:

$$PTD = \sum PTD(i) \quad (2)$$

$$PTT = \sum PTT(j) \quad (3)$$

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

Índice de perdas técnicas de distribuição – IPTD: percentual de perdas técnicas em relação à energia injetada em cada nível de tensão:

$$IPTD_{(i)} = \frac{PTD_{(i)}}{EID_{(i)}} \times 100[\%] \quad (4)$$

Índice de perdas técnicas de transformação – IPTT: percentual de perdas técnicas em relação à energia injetada em cada transformação entre os níveis de tensão:

$$IPTT_{(j)} = \frac{PTT_{(j)}}{EPT_{(j)}} \times 100[\%] \quad (5)$$

Assunto: Premissas de Cálculo e Indicadores	Seção: 7.1	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 8 de 26
--	---------------	---------------	--------------------------	--------------------

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

$$PPT = \left(\frac{PT}{E_1} \right) \times 100[\%] \quad (6)$$

Percentagem de Perdas Global – PPG: perdas globais representadas percentualmente em relação à energia injetada:

$$PPG = \left(1 - \frac{E_F}{E_1} \right) \times 100[\%] \quad (7)$$

5. DADOS E INFORMAÇÕES A SEREM FORNECIDAS PARA O CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS

- 5.1 A distribuidora deve utilizar técnicas de medição e de tratamento dos dados necessários para o cálculo das perdas técnicas.
- 5.2 A distribuidora deve encaminhar à ANEEL, até 180 dias antes da data da revisão tarifária, as informações para o cálculo das perdas técnicas, de acordo com o estabelecido no Módulo 6.
- 5.3 As informações para o cálculo das perdas técnicas devem ser apuradas 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 Em função das informações prestadas pela distribuidora, a ANEEL estabelecerá os valores e os índices das perdas técnicas.
- 5.7 Os fatores de carga e perdas das redes e transformações serão obtidos das curvas de carga provenientes da campanha de medição de que trata o Módulo 2.

Assunto: Metodologia de Cálculo de Perdas Técnicas de Demanda	Seção: 7.2	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 9 de 26
---	---------------	---------------	--------------------------	--------------------

SEÇÃO 7.2 – METODOLOGIA DE CÁLCULO DE PERDAS TÉCNICAS DE DEMANDA.

1 OBJETIVO

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

2. PERDAS TÉCNICAS DE DEMANDA EM SDAT.

- 2.1 As perdas técnicas de demanda em SDAT são definidas por meio de fluxos de carga, informados pela distribuidora, referentes à máxima demanda coincidente no período de apuração dos dados, para cada nível de tensão.

3. PERDAS DE DEMANDA EM SDMT.

- 3.1 As perdas de demanda das redes dos 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.
- 3.2 As redes do SDMT que interligam subestações de distribuição deverão ser tratadas como as redes do SDAT.
- 3.3 Cálculo do Coeficiente de Densidade de Carga do alimentador
 - 3.3.1 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:

$$l_b = \frac{\sum_{i=1}^{Nt} (d_i \times Snom_i)}{\sum_{i=1}^{Nt} Snom_i} \quad (8)$$

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 transformado i ;

Assunto: Metodologia de Cálculo de Perdas Técnicas de Demanda	Seção: 7.2	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 10 de 26
---	---------------	---------------	--------------------------	---------------------

3.3.2 De posse da distância da carga equivalente do alimentador, o valor do coeficiente de densidade de carga do alimentador σ 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.

Intervalo de I_b/R	Expoente σ
$0,00 \leq I_b/R < 0,55$	-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

Tabela 1 - Avaliação do expoente σ em função de I_b/R .

3.4 As perdas de demanda para as redes em SDMT para cada circuito são obtidas por meio da expressão a seguir:

$$\Delta p^{SDMT} = \frac{\left(p_{\max}^{SDMT} \right)^2 I_{\text{tot}}^{SDMT}}{m_p^{SDMT}} \left(\frac{v_b^{SDMT}}{v^{SDMT}} \right)^2 \left(\frac{\cos \varphi_b^{SDMT}}{\cos \varphi^{SDMT}} \right)^2 \quad [kW] \quad (9)$$

Onde,

Δp^{SDMT} : perdas de demanda do SDMT [kW];

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

I_{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 na Tabela 4 desta seção utilizar 13,8 kV;

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

φ_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 na Tabela 4 desta seção, utilizar 18,2°;

φ^{SDMT} = ângulo do fator de potência do SDMT [graus].

Assunto: Metodologia de Cálculo de Perdas Técnicas de Demanda	Seção: 7.2	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 11 de 26
---	---------------	---------------	--------------------------	---------------------

A lei geral do momento de perdas é definida como:

$$m_p^{SDMT} = \alpha (n_d)^\beta (n_p)^\gamma \left[\frac{MW^2 km}{kW} \right] \quad (10)$$

Onde,

n_d : 360/ θ ;

θ : ângulo do setor circular do circuito do SDMT [graus];

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

α : $a * (r_t + r_r)^b$

β : $c + (d * \ln(r_t / r_r))$

γ : 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 $d_{c_{eq}}$.

3.4.1 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 σ_x definido anteriormente. Os coeficientes podem ser obtidos pelas tabelas 2, 3 e 4:

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 2: condição dada por $r_t \leq 0,6910$ [Ω] e $r_r \leq 0,6910$ [Ω].

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

Assunto: Metodologia de Cálculo de Perdas Técnicas de Demanda	Seção: 7.2	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 12 de 26
---	---------------	---------------	--------------------------	---------------------

Tabela 3: condição dada por $rt \geq 0,6910[\Omega]$ e $rr > 0,6910 [\Omega]$

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

Tabela 4: condição dada por $rt < 0,6910 [\Omega]$ e $rr > 0,6910 [\Omega]$.

3.4.2 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 , σ , n_p , θ e R , conforme definidos anteriormente;
- São sorteados pontos de carga, considerando a densidade de carga σ , dentro de um setor circular definido por θ 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.

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

3.4.4 O efeito da geração distribuída – GD sobre as perdas em circuitos do SDMT é avaliado segundo uma parcela de perdas de demanda - ΔP_G , a ser deduzida do cálculo de perdas, conforme expressão a seguir:

$$\Delta P_G = \begin{cases} \frac{-n_f \cdot rt \cdot G \cdot S_G}{3V^2} \left\{ S_G - 2 \cdot S_0 \left[1 - \frac{G^{\sigma+2}}{(\sigma+3)L^{\sigma+2}} \right] \right\}, & \sigma \geq 0 \\ \frac{-n_f \cdot rt \cdot G \cdot S_G}{3V^2} \left\{ S_G - 2 \cdot S_0 \left[1 + \frac{\sigma \cdot G}{2L} - \frac{(\sigma+1)G^{-\sigma}}{(1-\sigma)L^{-\sigma}} \right] \right\}, & -2 \leq \sigma < 0 \end{cases} \quad (11)$$

Assunto: Metodologia de Cálculo de Perdas Técnicas de Demanda	Seção: 7.2	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 13 de 26
---	---------------	---------------	--------------------------	---------------------

Onde:

$S_0 = \sqrt{P_0^2 + Q_0^2}$: é carga total suprida e σ é o coeficiente de variação da densidade de carga no setor circular;

$S_G = P_G + jQ_G$: é a carga total suprida pela geração distribuída localizada a uma distância G da origem;

n_f : é o número de fases;

rt: resistência do tronco [Ω];

V: tensão do alimentador [V];

L: comprimento do alimentador [km];

3.4.5 O desenvolvimento da expressão anterior é apresentado no Anexo III deste módulo.

4 PERDAS DE DEMANDA EM SDBT.

4.1 Para as redes dos 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 03.

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

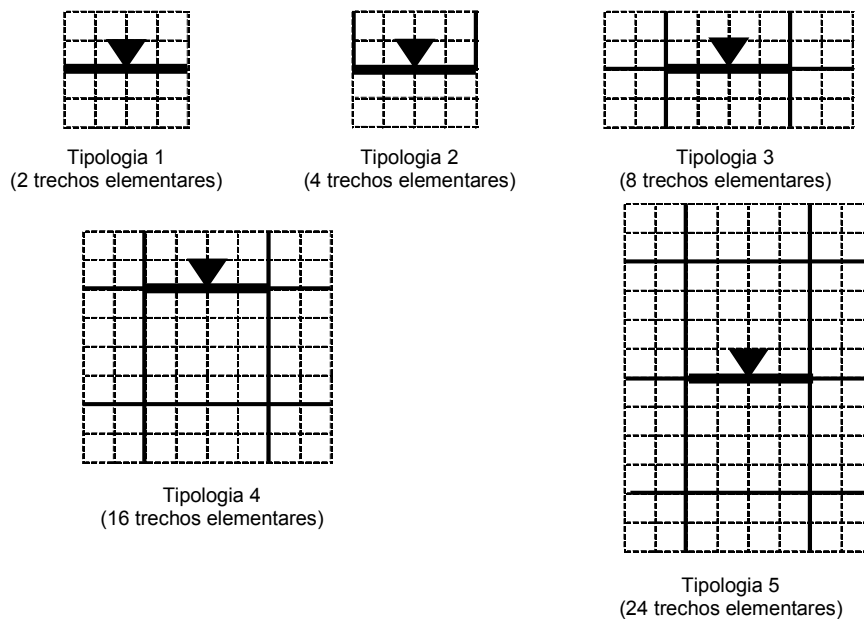


Figura 1 - Tipologias de redes de baixa tensão.

Assunto: Metodologia de Cálculo de Perdas Técnicas de Demanda	Seção: 7.2	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 14 de 26
---	---------------	---------------	--------------------------	---------------------

4.3 Para um trecho elementar, as perdas de demanda correspondem à expressão (12):

$$\Delta p_{SDBT} = f(r, l, i, I_j) = \int_{x=0}^l r(ix + I_j)^2 dx = r \times \left(\frac{i^2 \times l^2}{3} + i \times I_j \times l + I_j^2 \right) \times 10^{-6} [MW] \quad (12)$$

Onde, os parâmetros são apresentados no modelo de trecho de rede elementar da figura 2 desta seção:

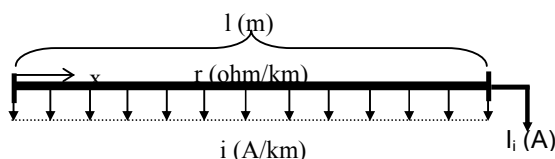


Figura 2 - Trecho de rede elementar.

Onde:

Δp_{SDBT} = perdas de demanda 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];

r : resistência por unidade de comprimento [Ω /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];

5 PERDAS DE DEMANDA NOS TRANSFORMADORES

5.1 As perdas de demanda dos transformadores são obtidas por meio dos dados de placa para os transformadores de potência e dados de normas técnicas para os transformadores de distribuição, são calculadas de acordo com a expressão a seguir:

$$\Delta p_{TR} = \sum_{t=1}^{nt} \left(\Delta p_{fe}^t + (f_U^t)^2 \times \Delta p_{cu}^t \right) \times 10^{-3} [MW] \quad (13)$$

Onde,

Δp_{TR} = perdas de demanda do transformador em [MW];

Δp_{fe}^t : perdas no ferro ou a vazio do transformador t [kW];

Δp_{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.

Assunto: Metodologia de Cálculo de Perdas Técnicas de Demanda	Seção: 7.2	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 15 de 26
---	---------------	---------------	--------------------------	---------------------

f_U^t : fator de utilização do transformador t.

6 PERDAS DE DEMANDA EM RAMAIS E MEDIDORES

6.1 Perdas de demanda em ramais de ligação

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

$$\Delta p_R = R \left(\frac{I_f}{F_d} \right)^2 \times (3N_{UC3} + 3N_{UC2} + 2N_{UC1}) \times 10^{-6} [\text{MW}] \quad (14)$$

Onde:

Δp_R = perdas de demanda dos ramais em [MW];

R: resistência média dos condutores dos ramais de ligação [Ω];

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

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

$$i_f = \frac{E_{form}^B \times 10^6}{FC_{SDBT} \cdot \cos\Phi (3N_{UC3}^3 V_F^{3f} + 2N_{UC2}^2 V_F^{2f} + 2N_{UC1}^2 V_F^{2f1} + N_{UC1}^1 V_F^{1f}) \times 8760} \quad (15)$$

Onde:

E_{form}^B: total de energia consumida (calculada) pelas unidades consumidoras do Subgrupo B (MWh);

cos Φ : 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;

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

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

V^{2f1} : tensão de fase das unidades consumidoras alimentadas em 1 fase e 3 fios;

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

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

6.2 Perdas de demanda nos medidores

6.2.1 Para os medidores serão computadas as perdas nas bobinas de tensão localizadas nas unidades consumidoras do grupo B. São considerados 1,2 W de perdas por

Assunto: Metodologia de Cálculo de Perdas Técnicas de Demanda	Seção: 7.2	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 16 de 26
---	---------------	---------------	--------------------------	---------------------

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:

$$\Delta p_M = 1,2 \times (3 \times NUC_3 + 2 \times NUC_2 + NUC_1) \times 10^{-3} [kW] \quad (16)$$

Onde,

Δp_M = perdas de demanda 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 de Perdas Técnicas de Energia	Seção: 7.3	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 17 de 26
---	---------------	---------------	--------------------------	---------------------

SEÇÃO 7.3 – CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS DE ENERGIA.

1 OBJETIVOS

- 1.1 Estabelecer a metodologia para a apuração das perdas de energia por meio das perdas de demanda.

2 PERDAS DE ENERGIA EM SDAT

- 2.1 Para o SDAT as perdas de energia podem ser obtidas diretamente do fluxo de carga, considerando a sazonalidade das cargas. O estudo deve considerar pelo menos 3 patamares de carga.
- 2.2 Alternativamente, os valores de perdas técnicas de energia podem ser avaliados pela diferença entre as medições de suprimento e das subestações de distribuição.
- 2.3 Na avaliação das perdas não deve ser computada as perdas nas transformações.

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 demanda é realizado na condição de carga máxima. Para o cálculo das perdas de energia é necessário um fator que estabeleça a relação entre a perda de demanda média e a de demanda para condição de carga máxima, conhecido como fator de perdas.
- 3.2 As perdas técnicas de energia das redes SDMT - ΔE_{SDMT} podem ser obtidas pela multiplicação entre as perdas de demanda - ΔP_{SDMT} , fator de perdas do SDMT - Fpe_{SDMT} e período de tempo analisado, conforme expressão a seguir:

$$\Delta E_{SDMT} = \Delta P_{SDMT} \times Fpe_{SDMT} \times 8760 [MWh / ano] \quad (18)$$

- 3.3 As redes do SDMT que interligam subestações de distribuição deverão ser tratadas como as redes do SDAT.

4 PERDAS DE ENERGIA EM SDBT

- 4.1 As perdas técnicas de energia das redes SDBT - ΔE_{SDBT} podem ser obtidas pela multiplicação entre as perdas de demanda - ΔP_{SDBT} , fator de perdas médio do SDBT - Fpe_{SDBT} e período de tempo analisado, conforme expressão a seguir:

$$\Delta E_{SDBT} = \Delta P_{SDBT} \times Fpe_{SDBT} \times 8760 [MWh / ano] \quad (20)$$

Assunto: Cálculo de Perdas Técnicas de Energia	Seção: 7.3	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 18 de 26
---	---------------	---------------	--------------------------	---------------------

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 as perdas de demanda no cobre multiplicadas pelo fator de perdas médio da transformação tipo k e seu período de análise, conforme definido na expressão a seguir.

$$\Delta E_T = 8760 \times \sum_{i=1}^{n_t} (\Delta p_{je}^i + \Delta p_{cu}^i \times Fpe_{TR}) [MWh] \quad (22)$$

6. PERDAS DE ENERGIA NOS RAMAIS DE LIGAÇÃO E MEDIDORES

- 6.1 As perdas de energia para os ramos de ligação e medidores ΔE_{RM} são obtidas pela multiplicação entre as respectivas perdas de demanda do ramal - ΔP_R , fator de perdas - Fpe_{SDBT} e período de tempo analisado, somado as perdas de demanda nos medidores - ΔP_M multiplicadas pelo período de tempo analisado, conforme definido na expressão a seguir.

$$\Delta E_R = (\Delta P_R \times Fpe_R + \Delta P_M) \times 8760 [MWh] \quad (23)$$

Assunto: Cálculo da Densidade de Carga por Meio da Distância de Carga Equivalente	Seção: Anexo I	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 19 de 26
--	-------------------	---------------	--------------------------	---------------------

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 σ de densidade de carga, definido como:

$$d = d_0 r^\sigma \tag{24}$$

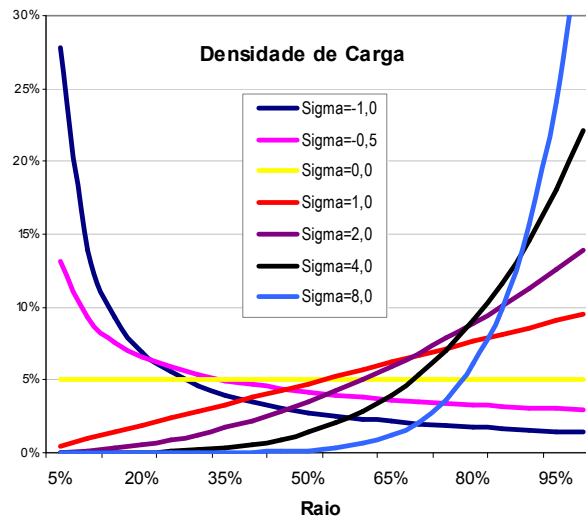


Figura 1 - Perfis de densidade de carga ao longo do raio do setor circular, para diferentes valores do coeficiente de densidade de carga.

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.

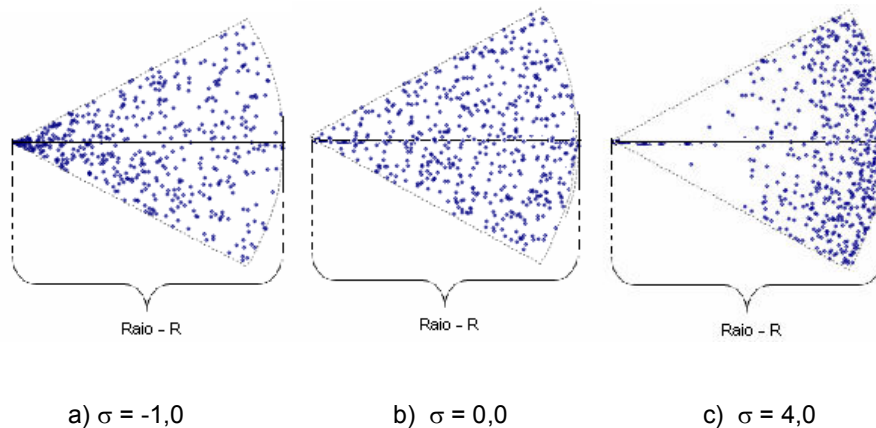


Figura 2 - Casos com diferentes densidades de carga e ângulos de atuação.

Assunto: Cálculo da Densidade de Carga por Meio da Distância de Carga Equivalente	Seção: Anexo I	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 20 de 26
--	-------------------	---------------	--------------------------	---------------------

Para a apuração do expoente σ 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 (24) se dá pela seguinte equação, conforme ilustrado na Figura 3 deste anexo:

$$dc_{eq} = \frac{\int_{r=0}^{l_b} (d(r) \times \theta r) dr}{\int_{r=0}^R (d(r) \times \theta r) dr} = 0,5 \quad (25)$$

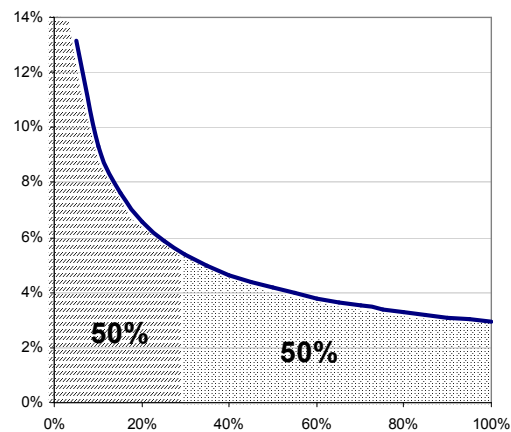


Figura 3: Distância equivalente da carga do setor circular para $\sigma = -0,5$.

O desenvolvimento da Equação 25 resulta em:

$$dc_{eq} = R \times 0,5^{\frac{1}{\sigma+2}} \quad (26)$$

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

$$\sigma = \frac{\log 0,5}{\log \frac{dc_{eq}}{R}} - 2 \quad (27)$$

Assunto: Cálculo da Densidade de Carga por Meio da Distância de Carga Equivalente	Seção: Anexo I	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 21 de 26
--	-------------------	---------------	--------------------------	---------------------

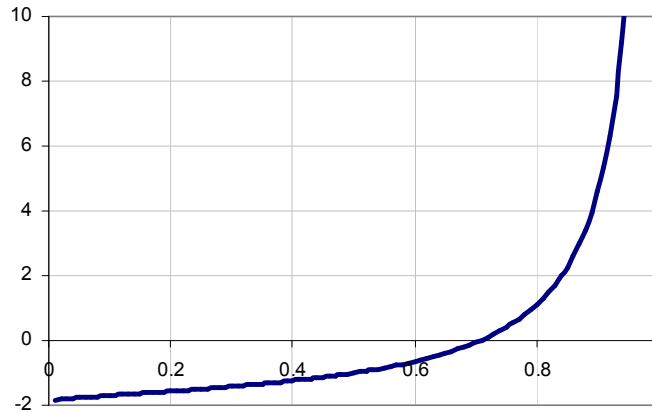


Figura 4: Variação do expoente σ em função da distância da carga equivalente (dc_{eq}/R).

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 9:

Intervalo de dc_{eq}/R	Expoente σ
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

Tabela 1 - Avaliação do expoente σ em função de dc_{eq}/R .

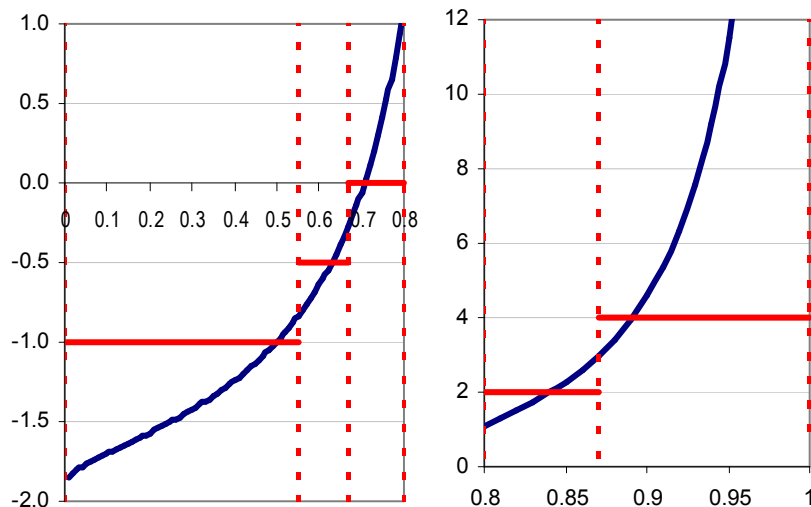


Figura 5: Avaliação do expoente σ em função de dc_{eq}/R .

Assunto: Lei Geral de Perdas para SDMT	Seção: Anexo II	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 22 de 26
---	--------------------	---------------	--------------------------	---------------------

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.

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

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

Adicionalmente, foram consideradas 5 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.

Assunto: Geração Distribuída	Seção: Anexo III	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 23 de 26
---------------------------------	---------------------	---------------	--------------------------	---------------------

ANEXO III – GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A variação nas perdas, devido à existência de fontes de geração distribuída, é analisada considerando-se o seu efeito sobre o tronco do alimentador ao qual estão conectadas e a forma de variação da carga alimentada.

1 Caso geral sem GD

Considere a densidade linear de carga σ num ponto x de um tronco de um alimentador de comprimento L representada pelas seguintes equações:

$$\rho(x) = \begin{cases} (\sigma + 2)S_0 \frac{x^{\sigma+1}}{L^{\sigma+2}} & \text{se } \sigma \geq 0 \\ -\sigma \frac{S_0}{L} \left[1 + (\sigma + 1) \frac{x^{-(\sigma+1)}}{L^{-(\sigma+1)}} \right] & \text{se } -2 \leq \sigma < 0 \end{cases}$$

Onde $S_0 = \sqrt{P_0^2 + Q_0^2}$ é carga total suprida e σ é o coeficiente de variação da densidade de carga no setor circular.

A correspondência dos valores do coeficiente σ com alguns casos particulares importantes da distribuição da carga ao longo do tronco alimentador é:

- $\sigma = -1$, densidade de carga constante no tronco, ou seja, carga uniformemente distribuída no tronco;
- $\sigma \geq 0$ para densidade de carga crescente no tronco (em particular $\sigma = 0$ resulta em crescimento linear da carga no tronco);
- $-2 \leq \sigma < -1$ para densidade de carga decrescente no tronco do alimentador.

A figura 1 ilustra estas situações, particularizadas para o caso linear, embora o modelo se aplique também a outras formas de variação.

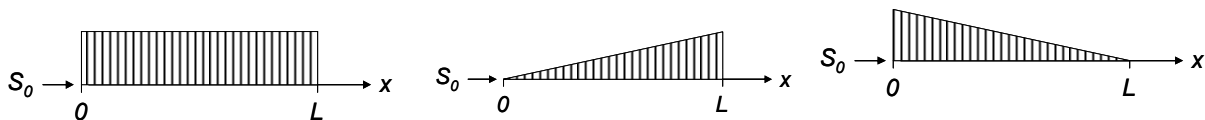


Figura 9 - alimentadores com carga uniformemente distribuída, linearmente crescente e decrescente.

Por sua vez, a carga numa posição x qualquer do alimentador pode ser calculada como:

Assunto: Geração Distribuída	Seção: Anexo III	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 24 de 26
--	----------------------------	----------------------	--------------------------	----------------------------

$$S(x) = S_0 - \int_0^x \rho(u) du = \begin{cases} S_0 \left(1 - \frac{x^{\sigma+2}}{L^{\sigma+2}} \right) & \text{se } \sigma \geq 0 \\ S_0 \left[1 + \frac{\sigma x}{L} - (\sigma+1) \frac{x^{-\sigma}}{L^{-\sigma}} \right] & \text{se } -2 \leq \sigma < 0 \end{cases}$$

É fácil verificar o atendimento das condições de contorno no início e final do alimentador, isto é, $S(0) = S_0$ e $S(L) = 0$.

Utilizando as expressões acima, calcula-se a perda de demanda por fase como:

$$P = \begin{cases} \frac{S_0^2 R}{3V^2} \int_0^L \left(1 - \frac{x^{\sigma+2}}{L^{\sigma+2}} \right)^2 dx & \text{para } \sigma \geq 0 \\ \frac{S_0^2 R}{3V^2} \int_0^L \left[1 + \frac{\sigma x}{L} - (\sigma+1) \frac{x^{-\sigma}}{L^{-\sigma}} \right]^2 dx & \text{para } -2 \leq \sigma < 0 \end{cases}$$

$$P = \begin{cases} \frac{2S_0^2 RL}{3V^2} \left(\frac{\sigma^2 + 4\sigma + 4}{2\sigma^2 + 11\sigma + 15} \right) & \text{para } \sigma \geq 0 \\ \frac{S_0^2 RL \sigma^2}{9V^2} \left(\frac{2\sigma^3 + 8\sigma^2 + \sigma - 23}{2\sigma^3 - 7\sigma^2 + 7\sigma - 2} \right) & \text{para } -2 \leq \sigma < 0 \end{cases}$$

2 Caso geral com inclusão de GD

Considerando agora uma fonte de geração distribuída $S_G = P_G + jQ_G$ localizada a uma distância G da origem, tem-se as condições mostradas na figura 2.

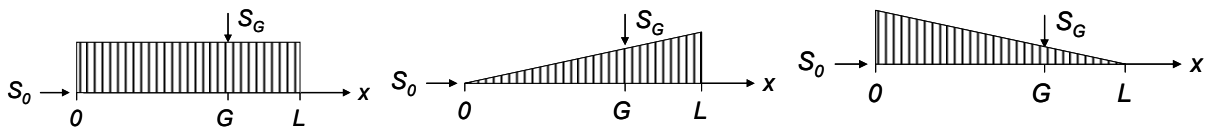


Figura 10 - alimentadores com carga uniformemente distribuída, linearmente crescente e decrescente e inclusão de GD.

As perdas, tendo-se em conta a GD, passam a ser:

$$P' = \frac{R}{3V^2} \int_0^G |S(x) - S_G|^2 dx + \frac{R}{3V^2} \int_G^L S^2(x) dx$$

Assunto: Geração Distribuída	Seção: Anexo III	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 25 de 26
---------------------------------	---------------------	---------------	--------------------------	---------------------

E, desenvolvendo a expressão acima, tem-se:

$$P' = \frac{R}{3V^2} \int_0^G [P^2(x) + Q^2(x) + P_G^2 + Q_G^2 - 2P(x)P_G - 2Q(x)Q_G] dx + \frac{R}{3V^2} \int_G^L S^2(x) dx$$

$$P' = \begin{cases} \frac{R}{3V^2} \int_0^G \left[S_0^2 \left(1 - \frac{x^{\sigma+2}}{L^{\sigma+2}} \right)^2 + S_G^2 - 2(P_0P_G + Q_0Q_G) \left(1 - \frac{x^{\sigma+2}}{L^{\sigma+2}} \right) \right] dx + \frac{R}{3V^2} \int_G^L S_0^2 \left(1 - \frac{x^{\sigma+2}}{L^{\sigma+2}} \right)^2 dx & \text{para } \sigma \geq 0 \\ \frac{R}{3V^2} \int_0^G \left\{ S_0^2 \left[1 + \frac{\sigma x}{L} - (\sigma+1) \frac{x^{-\sigma}}{L^{-\sigma}} \right]^2 + S_G^2 - 2(P_0P_G + Q_0Q_G) \left[1 + \frac{\sigma x}{L} - (\sigma+1) \frac{x^{-\sigma}}{L^{-\sigma}} \right] \right\} dx + \\ + \frac{R}{3V^2} \int_G^L S_0^2 \left[1 + \frac{\sigma x}{L} - (\sigma+1) \frac{x^{-\sigma}}{L^{-\sigma}} \right]^2 dx & \text{para } -2 \leq \sigma < 0 \end{cases}$$

$$P' = \begin{cases} \frac{R}{3V^2} \left\{ 2S_0^2 L \left(\frac{\sigma^2 + 4\sigma + 4}{2\sigma^2 + 11\sigma + 15} \right) + S_G^2 G - 2(P_0P_G + Q_0Q_G) G \left[1 - \frac{G^{\sigma+2}}{(\sigma+3)L^{\sigma+2}} \right] \right\}, & \sigma \geq 0 \\ \frac{R}{3V^2} \left\{ \frac{\sigma^2 S_0^2 L}{3} \left[\frac{2\sigma^3 + 8\sigma^2 + \sigma - 23}{2\sigma^3 - 7\sigma^2 + 7\sigma - 2} \right] \right\} + S_G^2 G - 2(P_0P_G + Q_0Q_G) G \left[1 + \frac{\sigma G}{2L} - \frac{(\sigma+1)G^{-\sigma}}{(1-\sigma)L^{-\sigma}} \right], & -2 \leq \sigma < 0 \end{cases}$$

Finalmente, resulta a variação na perda total de demanda do alimentador:

$$\Delta P_G = n_f (P - P') = \begin{cases} -\frac{n_f R G}{3V^2} \left\{ S_G^2 - 2(P_0P_G + Q_0Q_G) \left[1 - \frac{G^{\sigma+2}}{(\sigma+3)L^{\sigma+2}} \right] \right\}, & \sigma \geq 0 \\ -\frac{n_f R G}{3V^2} \left\{ S_G^2 - 2(P_0P_G + Q_0Q_G) \left[1 + \frac{\sigma G}{2L} - \frac{(\sigma+1)G^{-\sigma}}{(1-\sigma)L^{-\sigma}} \right] \right\}, & -2 \leq \sigma < 0 \end{cases}$$

Onde n_f é o número de fases.

Para a condição particular em que os fatores de potência da subestação e da geração distribuída são iguais vale a relação $P_0P_G + Q_0Q_G = S_0S_G$. Logo:

$$\Delta P_G = \begin{cases} -\frac{n_f R G S_G}{3V^2} \left\{ S_G - 2S_0 \left[1 - \frac{G^{\sigma+2}}{(\sigma+3)L^{\sigma+2}} \right] \right\}, & \sigma \geq 0 \\ -\frac{n_f R G S_G}{3V^2} \left\{ S_G - 2S_0 \left[1 + \frac{\sigma G}{2L} - \frac{(\sigma+1)G^{-\sigma}}{(1-\sigma)L^{-\sigma}} \right] \right\}, & -2 \leq \sigma < 0 \end{cases}$$

E a perda de demanda da rede arborescente a qual está conectada a GD deve ser corrigida como: $\Delta p_{corrigida} = \Delta p - \Delta P_G$

Assunto: Geração Distribuída	Seção: Anexo III	Revisão: 0	Data de Vigência: ...	Página: 26 de 26
---------------------------------	---------------------	---------------	--------------------------	---------------------

3 Caso com mais de uma GD no mesmo alimentador

No caso em que existem m fontes de geração distribuída no mesmo alimentador recomenda-se, por simplicidade, substituí-las por uma única equivalente, isto é:

$$S_G = \sum_{i=1}^m P_{G_i} + j \sum_{i=1}^m Q_{G_i} \quad \text{e} \quad G = \frac{\sum_{i=1}^m |S_{G_i}| G_i}{|S_G|}$$