

2

Modelos de Predição de Perda Média de Propagação

Neste capítulo é apresentado um resumo dos principais métodos para determinação da perda média de propagação na faixa de UHF. São modelos empíricos ou semi-empíricos, baseados em formulações teóricas para os problemas básicos de propagação envolvidos, a partir dos quais parâmetros e termos de correção são ajustados por dados experimentais.

Os principais modelos são o da Recomendação ITU-R P.1546, o modelo de Okumura-Hata e suas variantes e o modelo de Longley-Rice.

2.1.

Recomendação ITU-R P.1546-3

A Recomendação ITU-R P. 1546-3 - Método para predição de serviços terrestres ponto área na faixa de frequência de 30 MHz até 3000 MHz [22] - fornece um método a ser adotado para predição da intensidade do campo em serviços radiodifusão, serviços móvel terrestre, móvel marítimo, e certos serviços fixos (por exemplo, aqueles que utilizam sistemas ponto multiponto), operando na faixa de frequência compreendida 30 MHz e 3000 MHz e com distância na faixa de 1 km até 1000 km.

A recomendação baseia-se em curvas de propagação como a apresentada na figura 3.3, na qual pode ser obtido o valor da intensidade do campo (excedendo 50%, 10% e 1% do tempo) com potência efetiva irradiada (ERP) de 1 kW, nas frequências nominais de 100 MHz, 600 MHz e 2000 MHz respectivamente, em função de vários parâmetros. Algumas das curvas se referem a percursos terrestres e outros marítimos. Para se obter valores da intensidade do campo em faixas de frequência distintas às mencionadas anteriormente, é necessário fazer uso da interpolação ou extrapolação dos valores obtidos nas frequências nominais utilizando o método fornecido pela recomendação.

Os gráficos são baseados em medidas principalmente em condições de climas moderados em regiões sobre áreas marítimas frias e quentes. No caso de percursos mistos sobre áreas marítimas e terrestres, a Recomendação fornece um método para obter a estimativa combinando a intensidade do campo sobre estes dois tipos de percursos.

As curvas que representam percursos sobre o solo foram preparadas a partir de dados obtidos principalmente em condições de climas temperados como os encontrados em Europa e América do Norte. As curvas representando percursos sobre o mar foram preparadas a partir de dados obtidos, principalmente nas regiões do Mar Mediterrâneo e o oceano Atlântico no norte da Europa.

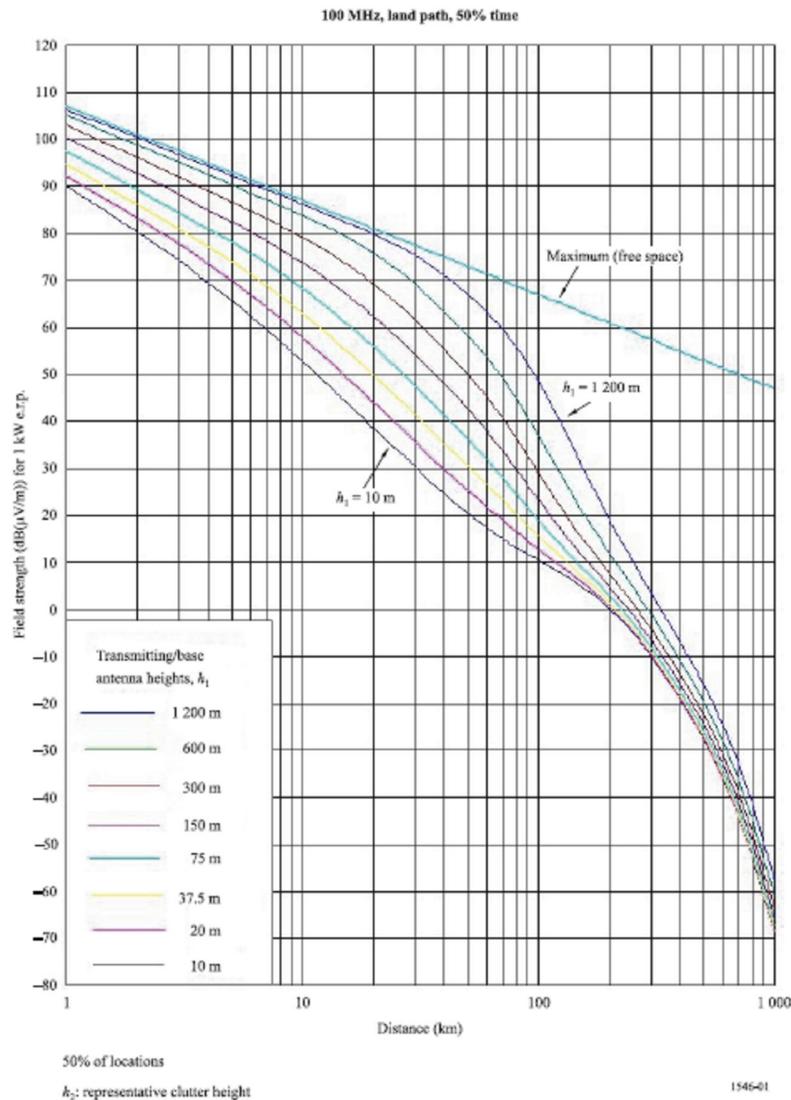


Figura 2.1 Curvas de Potência Excedendo 50 % do tempo na faixa de frequência entre 100 MHz

A seguir será apresentada uma breve descrição dos passos mais importantes da Recomendação para calcular o valor da intensidade de campo. Embora a recomendação possa ser aplicada tanto a percursos sobre a terra quanto sobre o mar, neste trabalho somente será descrito o procedimento para percursos sobre o solo.

2.1.1. Cálculo da Altura Nominal da Antena Transmissora

A altura efetiva da antena transmissora h_1 a ser utilizada no cálculo depende do comprimento e do tipo do enlace. Para percursos sobre o mar, o valor do h_1 é a altura da antena sobre o nível do mar. Para percursos sobre o solo, é calculada uma altura efetiva h_{eff} , definida como altura em metros acima do nível médio do terreno calculado em distâncias compreendidas entre 3 a 15 km. Este valor pode ser calculado através de informações topográficas do terreno.

O valor de h_1 é calculado de acordo com o tipo de terreno, distância e a disponibilidade do perfil do terreno. Para perfis com distâncias menores que 15 quilômetros, o valor de h_1 se calcula da seguinte maneira:

- No caso de não se ter informação topográfica do perfil

$$\begin{aligned} h_1 &= h_a && (m) && \text{para } d < 3 \text{ km} \\ h_1 &= h_a + (h_{eff} - h_a)(d - 3)/12 && (m) && \text{para } 3 \text{ km} < d < 15 \text{ km} \end{aligned} \quad (2.1)$$

- No caso de se ter a informação detalhada do perfil $h_1 = h_b$, onde h_b é a altura da antena sobre o nível médio calculado entre $0.2d$ e d km.

Se a distância entre Tx e Rx é maior que 15 km $h_1 = h_{eff}$

2.1.2.

Interpolação da intensidade de campo em função da altura h1

Na maioria dos casos, o valor da altura h1 não corresponde com os valores nominais dos gráficos. Nestes casos é necessário o uso de interpolação para o cálculo da intensidade de campo em relação à h1 através da seguinte expressão:

$$E = E_{\text{inf}} + (E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}) \frac{\log\left(\frac{h1}{h_{\text{inf}}}\right)}{\log\left(\frac{h_{\text{sup}}}{h_{\text{inf}}}\right)} \text{dB}(\mu\text{V} / \text{m}) \quad (2.2)$$

Onde

h_{inf} 600 m se $h1 > 1200$ m, do contrario h_{inf} é o menor valor nominal proximo de h1

h_{sup} 1200 m se $h1 > 1200$ m, do contrario h_{sup} é o maior valor nominal acima de h1

E_{inf} valor da intensidade de campo para h_{inf} para a distância d

E_{sup} valor da intensidade de campo para h_{sup} para a distância d

Quando h1 é menor que 10 m (o limite inferior das alturas nominais) deve ser aplicada extrapolação para se obter o valor da intensidade de campo para h1. Este processo é baseado no conceito de distância do horizonte para terra plana dada por $d_H(h) = 4.1\sqrt{h}$, onde h é a altura da antena transmissora h1 (m).

Para $d < d_H(h)$ o valor da intensidade de campo é dado pelo valor da intensidade de campo na altura de 10 m (obtido das curvas) na distância do horizonte, mais ΔE , com ΔE , definido como a diferença dos valores da intensidade de campo para a curva de 10 m a uma distância d e o valor da intensidade de campo na curva de 10 m na distância do horizonte.

Para $d \geq d_H(h)$ o valor da intensidade de campo é dado pelo valor da intensidade de campo na altura de 10 m a uma distância Δd alem da distância horizonte, onde Δd é a diferença entre d e a distância do horizonte para h1

O condicionamento anterior pode ser expresso por:

$$E = E_{10}(d_H(10)) + E_{10}(d) - E_{10}(d_H(h1)) \text{ dB}(\mu V / m) \quad \text{para } d < d_H(h1) \quad (2.3)$$

$$E = E_{10}(d_H(10) + d - d_H(h1)) \text{ dB}(\mu V / m) \quad \text{para } d \geq d_H(h1) \quad (2.4)$$

Na equação 2.4b, se $d_H(10) + d - d_H(h1)$ excede 1000 km, mesmo quando $d \leq 1000 \text{ km}$, a intensidade de campo pode ser encontrada através de extrapolação logarítmica com a distância:

$$E = E_{\text{inf}} + (E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}) \frac{\log\left(\frac{d}{D_{\text{inf}}}\right)}{\log\left(\frac{D_{\text{sup}}}{D_{\text{inf}}}\right)} \text{ dB}(\mu V / m) \quad (2.5)$$

com:

D_{inf} : Penúltimo valor para a distância (km)

D_{sup} : Último valor de distância (km)

E_{inf} : Valor da intensidade de campo para o penúltimo valor da distância
dB($\mu\text{V}/\text{m}$)

E_{sup} : Valor da intensidade de campo para o último valor da distância
dB($\mu\text{V}/\text{m}$)

Para valores maiores da distância d maiores de 1000 km esta recomendação não pode ser aplicada.

Em percursos terrestres como o cálculo da altura $h1$ da antena depende da altura efetiva h_{eff} , em alguns casos o valor de $h1$ pode resultar negativo. Nestes casos os efeitos de difração e espalhamento devem ser levados em consideração. Para $h1$ negativo, para se obter a intensidade total de campo deve-se obter primeiro o valor da intensidade de campo para $h1=0$ como descrito no item anterior (i.e. $h1 < 10 \text{ m}$), e adicionar uma correção $Ch1$, calculada como descrito a seguir.

Quando se conhece o perfil do terreno, o ângulo de visão θ_{eff} deve ser calculado. Este ângulo é definido como o ângulo de elevação de uma linha visada sobre os obstáculos até uma distância de 15 km desde o transmissor em direção do receptor. Assim esta correção é calculada como:

$$Ch1 = J(v') - J(v) \text{ dB} \quad (2.6)$$

Com

$$J(v) = \left[6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \right] \quad (2.7)$$

$$v' = 0.036 \sqrt{f} \quad (2.8)$$

$$v = 0.065 \theta_{eff} \sqrt{f} \quad (2.9)$$

onde

θ_{eff} é o ângulo de visada do perfil (graus)

f é a frequência (MHz)

A figura a seguir apresenta os valores de correção do ângulo de visada para as frequências nominais.

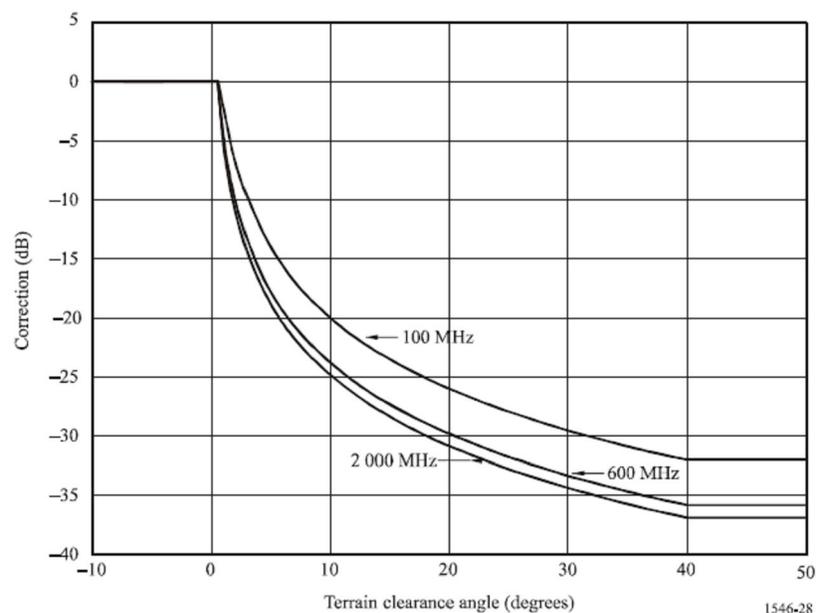


Figura 2.2 Fator de correção em função do ângulo de visada

2.1.3.**Interpolação da intensidade de campo em função da distância**

Os gráficos da recomendação apresentam o valor da intensidade de campo em função da distância d , na faixa de 1 km até 1000 km. Quando a distância do enlace a ser calculado é diferente aos valores nominais dos gráficos, se faz necessária o uso de interpolação para o cálculo da intensidade de campo de tal distância

$$E = E_{\text{inf}} + (E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}) \frac{\log\left(\frac{d}{d_{\text{inf}}}\right)}{\log\left(\frac{d_{\text{sup}}}{d_{\text{inf}}}\right)} \text{dB}(\mu\text{V} / \text{m}) \quad (2.10)$$

Com:

- d : distância do enlace em questão
- d_{inf} : menor valor do gráfico mais próximo de d
- d_{sup} : maior valor do gráfico mais próximo de d
- E_{inf} : Valor da intensidade de campo para d_{inf}
- E_{sup} : Valor da intensidade de campo para d_{sup}

Esta recomendação não é válida para valores de d menores que 1 km nem maiores de 1000 km.

2.1.4.**Interpolação da intensidade de campo em função da frequência**

Da mesma forma que para a distância e a altura da antena h_1 , é necessário o uso de interpolação ou extrapolação, se a frequência do enlace em questão não é nenhuma das frequências nominais (100 MHz, 600 MHz e 2000 MHz). Para a interpolação em frequência se utiliza a seguinte expressão:

$$E = E_{\text{inf}} + (E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}) \frac{\log\left(\frac{f}{f_{\text{inf}}}\right)}{\log\left(\frac{f_{\text{sup}}}{f_{\text{inf}}}\right)} \text{dB}(\mu\text{V} / \text{m}) \quad (2.11)$$

Com:

- f: frequência do enlace em questão (MHz)
- f_{inf} : valor correspondente ao valor nominal imediatamente menor que f
- f_{sup} : valor correspondente ao valor nominal imediatamente maior que f
- E_{inf} : Valor da intensidade de campo para f_{inf}
- E_{sup} : Valor da intensidade de campo para f_{sup}

2.1.5. Interpolação da intensidade de campo em função da percentagem de tempo

Valores da intensidade de campo para uma dada percentagem de tempo entre 1% e 50% do tempo devem ser calculado através de interpolação entre as percentagens nominais de 1%, 10% e 50% pela seguinte expressão:

$$E = E_{\text{sup}} \frac{(Q_{\text{inf}} - Q_t)}{(Q_{\text{inf}} - Q_{\text{sup}})} + E_{\text{sup}} \frac{(Q_t - Q_{\text{sup}})}{(Q_{\text{inf}} - Q_{\text{sup}})} \text{dB}(\mu\text{V} / \text{m}) \quad (2.12)$$

onde

- t: é a percentagem de tempo para a qual a predição é necessária
- t_{inf} : percentagem nominal inferior
- t_{sup} : percentagem nominal superior
- $Q_t = Q_i(t/100)$
- $Q_{\text{inf}} = Q_i(t_{\text{inf}}/100)$
- $Q_{\text{sup}} = Q_i(t_{\text{sup}}/100)$
- E_{inf} : Valor da intensidade de campo para a percentagem de tempo t_{inf}

E_{sup} : Valor da intensidade de campo para a percentagem de tempo t_{sup}

$Q_i(t)$ é a função de distribuição cumulativa inversa complementar.

Uma vez tendo calculado o valor do campo através das interpolações, deve ser considerada uma limitação em relação ao seu valor máximo. Isto é, o valor de intensidade de campo recebido no ponto, não deve exceder o valor máximo E_{max} dado por:

$$E_{max} = E_{fs} \quad dB(\mu V / m) \quad \text{para percursos sobre solo} \quad (2.13)$$

$$E_{max} = E_{fs} + E_{se} \quad dB(\mu V / m) \quad \text{para percursos sobre o mar} \quad (2.14)$$

onde o E_{fs} é o valor do campo para uma ERP de 1 kW dado por:

$$E_{fs} = 106.9 - 10 \log(d) \quad dB(\mu V / m) \quad (2.15)$$

e E_{se} é um ajuste aos valores das curvas dado por:

$$E_{se} = 2.38 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{d}{8.94}\right) \right\} \log\left(\frac{50}{t}\right) \quad dB \quad (2.16)$$

onde

- d: é à distância em km;
- t: é a percentagem de tempo.

2.2. Modelo de Okumura - Hata

O modelo de Okumura foi desenvolvido com base em um grande número de medidas realizadas na região de Tóquio, em frequências na faixa de UHF. O método de cálculo baseia-se na introdução de correções, obtidas graficamente, sobre o valor da atenuação de espaço livre. A expressão básica do método é a seguinte [23],[24],[25]:

$$L(\text{dB}) = L_{\text{bf}} + A(f, d) - G_{\text{AREA}}(f, \text{morf}) - G_{\text{T}}(h_{\text{TE}}, d) - G_{\text{R}}(h_{\text{R}}, d) \quad (2.17)$$

para $1 \leq d \leq 100 \text{ km}$ e $100 < f < 3000 \text{ MHz}$

O termo $A(f, d)$ corresponde a uma atenuação adicional média para áreas urbanas, com altura efetiva da antena transmissora de 200 m e altura da antena receptora de 3m, em função da frequência (limitada entre 100 e 3.000 MHz) e do comprimento do enlace (limitado entre 1 e 100 km), dada pela figura 2.2a. O ganho $G_{\text{AREA}}(f, \text{morf})$ é uma correção também função da frequência para áreas de morfologia suburbana, quase-aberta e aberta (rural).

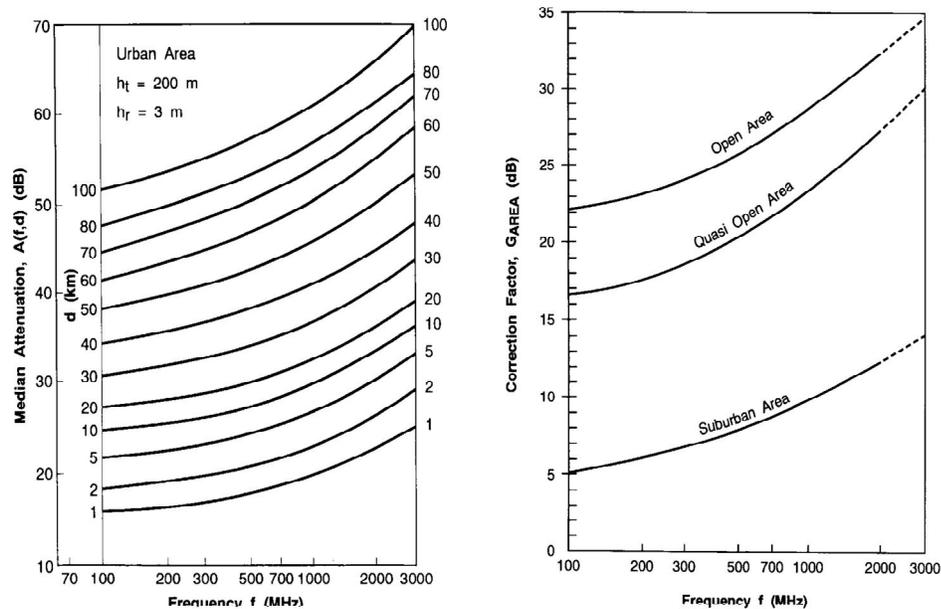


Figura 2.3 Fatores do método de Okumura: (a) atenuação adicional média para área urbana; (b) correções para outras morfologias

Os fatores $G_T(h_{Te}, d)$ e $G_R(h_R, d)$ são fatores de correção para antenas com alturas diferentes das de referência, funções também da distância e obtidos da figura 2.2b, que mostra também como determinar a altura efetiva da antena de transmissão.

Okumura não é muito aplicado na prática, devido à sua natureza gráfica. Para se trabalhar melhor com este modelo utilizamos as expressões ajustadas por Hata quem criou uma formulação empírica do modelo gráfico de Okumura. A atenuação na formulação de Hata para áreas urbanas pode ser calculada por [23],[24]:

$$L_{urbana} = 69.55 + 26.16 \cdot \log f - 13.82 \cdot \log h_t - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \cdot \log h_t) \cdot \log d \quad (2.18)$$

onde : L = atenuação em dB

f = frequência em MHz – $150 \leq f \leq 1500$ MHz

d = distância em km – $1 \text{ km} \leq d \leq 20 \text{ km}$

h_t = altura do transmissor em metros – $30 \text{ m} \leq h_t \leq 200 \text{ m}$

$a(h_r)$ = fator de correção em dB

h_r = altura do receptor em metros – $1 \text{ m} \leq h_r \leq 10 \text{ m}$

Fator de correção para cidades pequenas e médias:

$$a(h_r) = (1.1 \cdot \log f - 0.7)h_r - (1.56 \cdot \log f - 0.8) \quad (2.19)$$

Fator de correção para cidades grandes

$$a(h_r) = 8.29(\log 1.54 \cdot h_r)^2 - 1.1 \quad \text{Para } f \leq 300 \text{ MHz} \quad (2.20)$$

$$a(h_r) = 3.2(\log 11.75 \cdot h_r)^2 - 4.97 \quad \text{Para } f \geq 300 \text{ MHz} \quad (2.21)$$

Para obter a perda de propagação em áreas suburbanas e rurais modifica-se a equação para área urbana das seguintes formas:

$$L_{suburbana} = L_{urbana} - 2 \left[\log \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5.4 \quad (2.22)$$

$$L_{rural} = L_{urbana} - 4.78(\log f)^2 + 18.33 \log f - 40.94 \quad (2.23)$$

2.3. Modelo de Longley-Rice [26]

O modelo de Longley-Rice considera o perfil detalhado do terreno e exige implementação computacional, calculando o campo de forma recursiva em função da distância ao transmissor, considerando os valores anteriores em cada ponto do perfil. O procedimento é bastante extenso, sendo descritas aqui apenas suas características.

No modo ponto-a-ponto, utilizando o perfil de elevação do terreno, o modelo gera um ajuste do valor médio de atenuação (i.e. atenuação relativa ao espaço livre) levando em consideração os três mecanismos de propagação: propagação em linha de visada com reflexão no solo, difração e espalhamento troposférico.

Condições de propagação anormais, como dutos e outros fenômenos que eventualmente ocorrem, são levadas em consideração através das especificações do clima e variabilidade com o tempo. A atenuação desejada para um determinado percurso, para percentagens de tempo especificadas pelo usuário, localização e situação do receptor é obtida a partir de ajuste utilizando o desvio padrão observado empiricamente em relação à atenuação média de referência. São as seguintes as bases de dados requeridas e condições de aplicação do modelo.

Base de Dados de propagação

Base de dados de Medidas ITS.

Base de Dados do Terreno

3 arc sec U.S. data.

30 arc sec Globe data.

Tipo Percursos para Análise

Linha de visada com desobstrução da primeira zona de Fresnel.

Difração.

Transhorizonte.

Perdas na Propagação

Linha de visada.

Difração: terra plana, e método de espalhamento troposférico por duplo gume de faca.

Condições anormais de propagação incluindo dutos via especificações do clima e variabilidade do tempo.

Variabilidade

Tempo

Local

Situação

Faixa de frequência desde 20 MHz até 20000 MHz

Comprimento do percurso de 1 km até 2000 km

Altura dos terminais acima do nível do terreno desde 0,5 m até 2000 m.

Refratividade atmosférica entre 250 N-unidades e 400 N-unidades.

Polarização vertical ou horizontal

Variação do tempo e local entre 0,1% e 99,9%.