

**ANGELO ANTONIO LEITHOLD**

**REFLETORES E EFEITO TERRA EM ANTENAS**

**CURITIBA, MARÇO DE 2003**

## REFLETORES E EFEITO TERRA.

Os refletores se disseminaram largamente nos sistemas irradiantes, a alteração de impedância e o diagrama resultante da distância de uma antena ao solo é largamente utilizada. A forma e a distância do refletor à antena força seu comportamento, se determinado um diagrama a antena trabalha dentro dele. Um dos parâmetros que imediatamente percebidos, é a relação frente/costas no caso de antenas direcionais, pois à medida que esta relação aumenta, conseqüentemente aumentará a diretividade da antena. A reflexão na ionosfera e alteração de lóbulos é função da distância e diâmetro dos elementos. Com o passar do tempo e experiências, chegou-se à conclusão que estes praticamente se igualam em forma e dimensões aos dipolos ou monopolos dos quais fazem parte. Numa antena direcional cilíndrica, por exemplo, recomenda-se que os elementos parasitas também o sejam, os comprimentos físicos daqueles, se refletores devem ser ligeiramente maiores que o elemento ativo em cinco a dez por cento. No caso de refletores planos sua superfície não precisa ser infinita, basta que seja ressonante, ou seja, uma superfície refletora contínua cuja malha não ultrapasse a 10% do comprimento de onda aplicado. Uma vez feito este procedimento alterará a impedância e largura de faixa do sistema resultante, o dipolo, não mais será um dipolo isolado, passará a se comportar como uma rede com todas as características dadas pela disposição dos elementos interferentes. Para uma antena situada a uma distância considerada "S" da superfície ressonante, tem-se um sistema com uma antena real e uma antena virtual, isto é uma rede com seu dipolo e sua imagem a uma distância 2S, funciona como se fossem duas antenas interagindo.

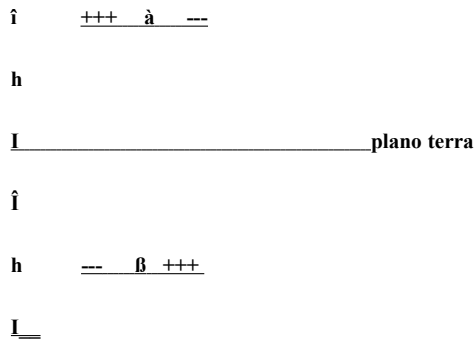
Se o dipolo for de meia onda e estiver na polarização horizontal é uma rede com os elementos 1 e 2, real e virtual respectivamente. O ganho do sistema pode ser considerado como ganho no plano  $f$ , ou  $G(f)$ , onde a antena real passa a ser elemento 1, e a antena virtual ou imagem elemento 2, onde  $I_1$  = Corrente na antena.  $I_2$  = Corrente na imagem,  $Z_{11}$  = Impedância própria da antena.  $Z_{22}$  = Impedância mútua entre as antenas,  $V_1 = I_1 \times Z_{11} + I_2 \times Z_{12}$ , levando-se em conta que a imagem tem o mesmo valor numérico, porém por ser virtual muda seu sinal temos assim  $I_1 = -I_2$ . A impedância no ponto de excitação é dada por  $Z_1$ , onde  $Z_1 = V_1 / I_1$  que é a resultante da impedância real e sua imagem, isto é  $Z_1 = Z_{11} - Z_{12}$ . A parte real tem  $R_1 = R_{11} - R_{12}$ , assim, o campo  $E(f)$  quando longitudinal, pode ser dado a uma determinada distância como  $E(f) = 2kI_1 \sin(dr \cos f / 2)$ . Logo, na mesma distância "r", o campo produzido pelo dipolo de meia onda EMO será  $E_{MO} = kI_0$ , sendo a corrente  $I_0$  para dada potência  $W$  na entrada da rede em cada elemento dada por  $W_1 = I_1^2 (R_{11} - R_{12}) = W_2$ . Assim,  $W = W_1 + W_2$ . Então,  $I_1 = \sqrt{W / 2(R_{11} - R_{12})}$ . Logo, para uma determinada potência  $W$  a corrente  $I_0$  no dipolo será dada por  $I_0 = \sqrt{W / 2R_{00}}$ . A potência entregue à antena real então é dada por  $I_0^2 R_{00}$ , pois  $W_1 = W / 2 = I_0^2 R_{00}$ . Os campos produzidos pelas duas antenas são dados por  $E(f) = 2k \sqrt{W / 2(R_{11} - R_{12})} \sin(dr \cos f / 2)$ , assim,  $E_{MO}(f) = k \sqrt{W / 2R_{00}}$ , portanto o ganho  $G_C(f)$  pode ser deduzido como  $G_C(f) = E(f) / E_{MO}(f)$ , assim,  $G_C(f) = 2k \sqrt{W / 2(R_{11} - R_{12})} \sin(dr \cos f / 2) / k \sqrt{W / 2R_{00}}$ .  $D$  pode ser expresso em termos de  $S$ , onde  $d = 2S$  onde  $G_C(f) = 2k \sqrt{W / 2(R_{11} - R_{12})} |\sin(dr \cos f)|$ , a antena hipoteticamente é um dipolo, assim,  $R_{00} = R_{11}$ . Funcionando um dipolo sobre uma superfície plana qualquer, desde que

condutiva, haverá um incremento no campo na ordem de 2,3 vezes em relação ao dipolo no espaço livre e a grande altura em relação ao solo, ou seja, em torno de 7 dB. Na prática o ganho será bem menor, entre 5 a 6 dB em direção à frente de onda. A variação de  $R_{11}$  e  $R_{12}$  para dois dipolos de meia onda no espaço livre estando um em frente ao outro em função da distância  $S$  é conhecida há muitos anos. É válida tanto para dipolos em frente um ao outro, quanto para dipolos em frente a um refletor utilizando um condutor perfeito de dimensões infinitas. Estas conclusões também podem ser utilizadas para um dipolo sobre o solo cujas variações de impedância variam de acordo com a altura em comprimentos de onda. Um dipolo de meia onda e um refletor plano, cuja distância entre eles seja de um quarto de onda, a distância entre o dipolo e sua imagem será de meia onda, recorrendo a tabelas existentes (abaixo),  $R_{11}$  é  $73\Omega$ ,  $R_{11} - R_{12}$  para uma distância de meia onda gira em torno de  $85,7\Omega$ , utilizando  $G_c(f) = 2k \sqrt{W / 2(R_{11} - R_{12})} |\sin(\theta \cos f)|$ , cujo radicando é 0,85, e a raiz 0,92, o seno desta expressão vale  $\sin[(\theta / 2) \cos f] = 1$  cujo valor máximo atinge em  $0^\circ$ , onde  $f = 0^\circ$  então  $G_c(f) = 1,8$ . Uma vez obtido este resultado se houver dipolos dispostos paralelamente sobre uma superfície perfeitamente refletora existirá o dobro de dipolos devido às imagens da rede, isto quer dizer que para cada dipolo, haverá uma imagem, havendo desta forma a distribuição de energia numa só direção, a cada vez que se dobra a estrutura de uma rede, o ganho do sistema acrescido em 3 dB. Para dois refletores dispostos em  $90^\circ$  à distância conveniente, a multiplicação dos diagramas em semi planos muito grandes em relação aos dipolos dobra a imagem, o ganho aumenta. Este efeito é utilizado em frequências muito altas (SHF), na construção de antenas impressas. Dependendo da altura da antena para a terra o comportamento daquela varia. Quando se monta uma antena tanto na polarização horizontal, quanto na vertical, o efeito terra pode ser analisado como um refletor perfeito desde que dentro das faixas de frequência admissíveis, quer dizer, frequências baixas, médias e altas.

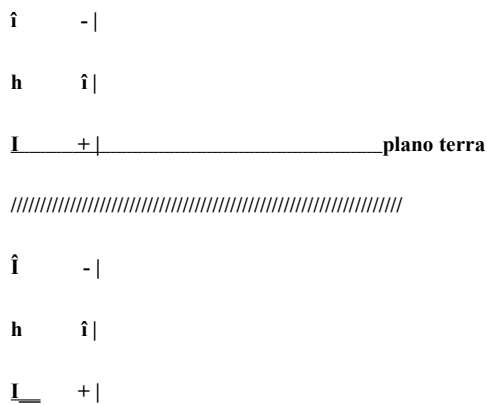
## EFEITO TERRA

Antenas próximas à terra ou a uma superfície que seja enxergada pela antena como se fosse um plano de terra, a influência desta ao elemento irradiante é importante. As condições devem ser controladas para analisar o efeito terra. Uma delas é distância da antena à terra que pode ser considerada um refletor plano de condutividade perfeita, outra, a interação entre um dipolo elementar em polarização horizontal ou vertical e seu plano de terra respectivo. Um dipolo vertical a uma determinada altura em relação ao solo chamada  $h$ , considerando-o condutor perfeito, as componentes dos campos elétrico e magnético irradiados no espaço aberto serão  $E_q$ ,  $E_r$ ,  $H_f$ , assim,  $E_q = (I dl \sin \theta / 4\pi r^2) [(-v \sin \theta / rc^2) + (\cos \theta / r^2 c) + (\sin \theta / vr^3)]$ , e,  $E_r = (I dl \cos \theta / 4\pi r^2) [(\cos \theta / r^2 c) + (\sin \theta / vr^3)]$  o campo magnético  $H_f = (I dl \sin \theta / 4\pi r^2) [(-\sin \theta / rc) + (\cos \theta / r^2)]$ . Para o plano de terra como condutor perfeito, as componentes tangencial e normal são anuladas entre si, desta forma, as cargas e correntes induzidas passam a fazer parte do sistema, o efeito imagem e o efeito real.

Na horizontal:



Vertical:



Sendo:  $E'_q$  a  $\text{sen } q$ ,  $E'_r$  a  $\text{cos } q$ ,  $E'_q$  a  $\text{sen } [p - q] = \text{sen } q$ ,  $E'_r$  a  $\text{cos } [p - q] = -\text{cos } q$ , tanto para o dipolo horizontal, quanto para o dipolo vertical, existe o dipolo imagem, este atua de forma que seu efeito, juntamente ao efeito terra alterem o diagrama de irradiação, impedância, ganho, dentre outros parâmetros da antena como se fosse um refletor, daí para efetuar a análise o sistema de estudo dos efeitos causados pela proximidade de duas antenas. Uma antena próxima a qualquer estrutura condutiva, "n" dipolos, outra antena, ou antenas, forma-se uma rede que deve ter certos aspectos físicos de proximidade entre seus elementos em comprimentos de onda. O sistema resultante tem um acoplamento concomitante e haverá somatórias de todas as características de todos os elementos ou acoplamento mútuo. O efeito do acoplamento mútuo, tanto para antena em polarização horizontal, quanto vertical têm em sua imagem a indução de correntes, suas impedâncias, lóbulos, e ganhos se interam, formando um sistema complexo. Uma antena a uma determinada distância da terra, existe a antena real e sua imagem. As correntes induzidas no dipolo real terão seu equivalente no dipolo imagem. O dipolo vertical muito próximo ao solo tem reforçados o campo irradiado e o campo recebido, no caso do dipolo horizontal, a impedância resultante do sistema será muito próxima de zero ohm, colocando o sinal em curto com a terra, anulando a antena. No caso do monopolo em polarização vertical, seu funcionamento no solo será similar ao dipolo vertical no espaço livre, sua imagem complementar o segmento real.

Um dipolo na polarização horizontal, levando-se em conta que esteja em espaço livre seu potencial (A) será dado por  $A = (\mu_0/4\pi) I_d (e^{-jkr}/r)$ . Por reciprocidade no dipolo imagem seu potencial (A') será dado por  $A' = (\mu_0/4\pi) I_d (e^{-jkr'}/r')$ . Podemos ver que  $r \approx r'$ , onde podemos escrever também que  $r' \approx r + 2h \sin D$ , onde,  $D \approx D'$ , assim,  $A_T = (m_0/4\pi) I_d (e^{-jkr}/r) (1 - e^{-j2kh \sin D})$  ou,  $A_T = 2A_0 \sin[(2 \text{ ph/l}) \sin D] e^{-j[kh \sin D - (p/2)]}$ , ainda,  $A_0 = (m_0/4\pi) I_d (e^{-jkr}/r)$ , assim,  $g(h) = 2 \sin [(2 \text{ ph/l}) \sin D]$  nos dará o chamado, fator distância, ou também chamado fator altura, onde  $E = E_0 g(h)$ . Ao variar a distância de um dipolo ao solo, variará o ângulo de partida, o alcance, a impedância, entre outros parâmetros. Conhecendo-se o ângulo de irradiação, e altura da camada iônica da Atmosfera (Ionosfera) onde reflete o sinal, se calcula o alcance de transmissão. Embaixo tabela que usa como base a altura da camada ionosférica arbitrada para fins de cálculo em torno de 300 Km (camada F2), a altura das camadas ionosféricas são dinâmicas e não estáticas, se alteram de acordo com a hora, propagação, época do ano, entre outras variáveis.

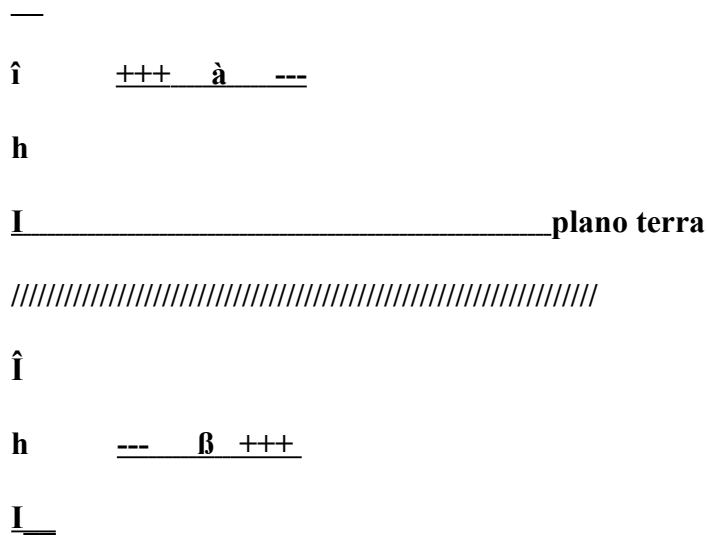
#### Altura do dipolo em comprimento de onda

<b>Altura do dipolo em comprimento de onda</b>	<b>Ângulo de partida</b>	<b>Alcance da 1ª reflexão em Km</b>
<b>0,28</b>	<b>63,5</b>	<b>300</b>
<b>0,30</b>	<b>56,3</b>	<b>400</b>
<b>0,33</b>	<b>50,2</b>	<b>500</b>
<b>0,35</b>	<b>45,0</b>	<b>600</b>
<b>0,42</b>	<b>36,8</b>	<b>800</b>
<b>0,485</b>	<b>31,0</b>	<b>1000</b>
<b>0,56</b>	<b>26,6</b>	<b>1200</b>
<b>0,635</b>	<b>23,2</b>	<b>1400</b>
<b>0,71</b>	<b>20,6</b>	<b>1600</b>
<b>0,79</b>	<b>18,4</b>	<b>1800</b>
<b>0,87</b>	<b>16,7</b>	<b>2000</b>
<b>0,955</b>	<b>15,2</b>	<b>2200</b>
<b>1,03</b>	<b>14,0</b>	<b>2400</b>
<b>1,12</b>	<b>13,0</b>	<b>2600</b>

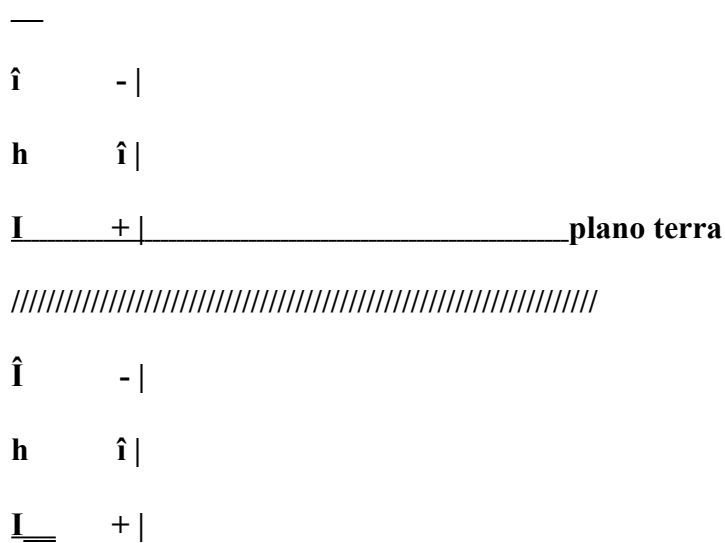
<b>Altura do dipolo em comprimento de onda</b>	<b>Ângulo de partida</b>	<b>Alcance da 1ª reflexão em Km</b>
<b>1,19</b>	<b>12,1</b>	<b>2800</b>
<b>1,28</b>	<b>11,3</b>	<b>3000</b>

Num dipolo de meia onda, dependendo da sua altura em comprimento de onda da terra, o efeito desta sobre aquele é de substancial importância. Além de alterar o ângulo de tiro (partida) da antena, também ocorre um efeito sobre a impedância no sistema irradiante. A antena passa a se comportar de forma sistêmica, ocorre o efeito de interação entre antena e terra, esta pode ser considerada como um refletor perfeito de dimensão infinita, formando uma imagem da antena tal qual a imagem formada por um objeto qualquer num.

Tomando como exemplo o dipolo horizontal de meia onda que esteja ressonando em determinada frequência, onde  $R \approx 73 \Omega$ , como  $R \approx 70 \Omega$ ,  $R \approx 70 \Omega$  para  $X \approx 0$  a uma distância de um comprimento de onda sobre a terra, ocorre o efeito imagem, ou uma “antena” refletida na terra, assim, a imagem plano horizontal pode ser esquematizada como:



A imagem plano vertical



A corrente que circula na antena real terá seu equivalente refletido na antena imaginária, as correntes circulando na antena real e imaginária são defasadas em  $180^\circ$ ,  $I_1/I_2 = -1$ , a partir da expressão de corrente, a expressão de impedância é  $Z_A = Z_{11} - (I_1/I_2) Z_{12}$ , assim  $Z_A = Z_{11} - Z_{12}$ , onde,  $Z_{12} \approx -12 - j 30$ , desta forma  $Z_A \approx 82 + j 30$ , na presença da terra ocorre o incremento do efeito imagem, isto é, a terra e antena passam a ter uma interação e desta surge uma componente reativa, resultando numa variação na sintonia (ressonância), impedância e ganho das antenas. Abaixo, está uma tabela de impedâncias de um dipolo sobre a terra em comprimentos de onda, note que em aproximadamente a cada quarto de onda temos uma impedância próxima de 73 ohms.

Impedância da antena dipolo polarização horizontal:

<b>Impedância da antena dipolo polarização horizontal</b>	<b>Altura da antena em relação à terra em l (Em comprimento de onda)</b>
<b>05</b>	<b>0,001</b>
<b>10</b>	<b>0,015</b>
<b>15</b>	<b>0,031</b>
<b>20</b>	<b>0,047</b>
<b>25</b>	<b>0,062</b>
<b>30</b>	<b>0,078</b>
<b>35</b>	<b>0,093</b>
<b>40</b>	<b>0,102</b>
<b>45</b>	<b>0,125</b>
<b>50</b>	<b>0,140</b>
<b>55</b>	<b>0,156</b>
<b>60</b>	<b>0,172</b>
<b>65</b>	<b>0,187</b>
<b>70</b>	<b>0,202</b>
<b>75</b>	<b>0,218</b>



<b>Impedância da antena dipolo polarização horizontal</b>	<b>Altura da antena em relação à terra em l (Em comprimento de onda)</b>
<b>80</b>	<b>0,234</b>
<b>90</b>	
<b>95</b>	<b>0,266</b>
<b>97,5</b>	<b>0,281</b>
<b>95</b>	<b>0,312</b>
<b>58,7</b>	<b>0,375</b>
<b>65</b>	<b>0,625</b>
<b>73,5</b>	<b>0,687</b>
<b>73,5</b>	<b>0,719</b>
<b>73,5</b>	<b>0,750</b>
<b>73,5</b>	<b>0,844</b>
<b>73,5</b>	<b>1,000</b>

Impedância da antena monopolo polarização vertical:

<b>Impedância da antena monopolo polarização vertical</b>	<b>Comprimento da haste da antena em <math>\lambda</math> (Comprimento de onda)</b>
<b>0</b>	<b>00.5</b>
<b>1</b>	<b>0.10</b>
<b>8</b>	<b>0.15</b>
<b>20</b>	<b>0.20</b>
<b>30</b>	<b>0.24</b>
<b>40</b>	<b>0.26</b>
<b>50</b>	<b>0.275</b>
<b>60</b>	<b>0.30</b>
<b>70</b>	<b>0.325</b>
<b>75</b>	<b>0.34</b>
<b>80</b>	<b>0.35</b>
<b>90</b>	<b>0.375</b>
<b>100</b>	<b>0.400</b>
<b>105</b>	<b>0.45</b>
<b>97,5</b>	<b>0,50</b>
<b>90</b>	<b>0,525</b>
<b>80</b>	<b>0.55</b>
<b>75</b>	<b>0,57</b>
<b>70</b>	<b>0.59</b>
<b>60</b>	<b>0.62</b>
<b>50</b>	<b>0.65</b>

<b>Impedância da antena monopolo polarização vertical</b>	<b>Comprimento da haste da antena em l (Comprimento de onda)</b>
<b>41</b>	<b>0.70</b>
<b>50</b>	<b>0.74</b>
<b>60</b>	<b>0.77</b>
<b>70</b>	<b>0.79</b>
<b>75</b>	<b>0.80</b>
<b>80</b>	<b>0.815</b>
<b>90</b>	<b>0.825</b>
<b>100</b>	<b>0.85</b>
<b>110</b>	<b>0.87</b>
<b>120</b>	<b>0.88</b>
<b>130</b>	<b>0.965</b>
<b>132.5</b>	<b>0.975</b>
<b>130</b>	<b>1.000</b>
<b>115</b>	<b>1.05</b>
<b>110</b>	<b>1.075</b>
<b>100</b>	<b>1.1</b>

O comprimento do monopolo em posição vertical em relação à terra que está na horizontal. A base da antena está exatamente sobre a superfície do terra, isto é a medida passada na coluna da direita é a medida da ponta da haste à base, e não da distância do monopolo ao solo. O acoplamento da antena à sua imagem, e suas resultantes, sempre vai depender da altura desta para a terra (Ou elemento condutivo), seja esta superfície terrestre propriamente dita ou um elemento disposto de forma a criar um campo enxergado como um terra virtual, radiais para a monopolo, ou simplesmente o refletor no caso da antena Yagi-Uda. O diagrama de irradiação também se altera com a altura da antena ao solo. Os parâmetros de uma antena variam com a distância desta a qualquer elemento interferente

tridimensionalmente. Antenas e estruturas metálicas próximas quando ressonantes interagem entre si, e podem ser vistas como uma “rede de antenas”.

### **Bibliografia**

Theoretical investigations into the Transmitting and Receiving Qualities of Antennae, vol 2 n.º 4 série IV, 1938

Esteves, Luiz Cláudio, 1980 - Antenas- Teoria Básica e Aplicações,

Krauss, Antenas, 1978

Schelkunoff, Antennae Phenomena, 1969

Jordan, Antenna Book, Transactions (IRE), Vol 9 AP3 n 4 pg 163 out 1954,

Yagi-Uda Antennas, 1954, pg 19 e 20,

Mullin, E.E., Radio Aerials, Oxford, 1949

Embratel, Manual de Antenas, Apostila de Sistematização de gráficos e ábacos, 1969. Sites da Internet, 2003.

©2003 Ângelo Antônio Leithold. Poderá ser utilizado somente para fins educacionais. Sendo expressamente proibido o uso comercial e a publicação em outros sites sem a autorização expressa do autor.