

Arranjo de Antenas

• Definição

É uma antena composta por um grupo de elementos radiantes iguais, alimentados e dispostos de maneira tal a se obter uma determinada combinação desejada de ganho / diagrama de radiação.

Arranjo Horizontal : determina o diagrama e o ganho de azimute ↔ **manipulação # faces**

Arranjo Vertical : determina o diagrama e o ganho de elevação ↔ **manipulação # níveis**

Figura 44 – Definição

Arranjo de antenas ou “array” é o nome dado ao agrupamento controlado de um conjunto de antenas iguais com o objetivo de se atingir especificações de ganho e de diagramas de radiação não realizáveis à partir do emprego de uma única antena isolada deste mesmo conjunto. Trata-se portanto de uma nova antena gerada pela combinação de um conjunto de antenas.

Pode-se configurar arranjos com qualquer tipo de antena tomado como elemento básico do arranjo, em aplicações de radiodifusão opera-se na maior parte dos casos com arranjos de antenas tipo yagi, log-periódica, painel, superturnstile, slot, anel FM, seta FM como apresentado nas figuras anteriores.

Usualmente não se opera com arranjos de parábolas, também não se trabalha com arranjos de antenas que sejam de tipos diferentes, como por exemplo a combinação de uma antena painel com uma antena slot, embora possa ser teoricamente possível desenhar um arranjo deste tipo.

Genericamente o desenho e análise de um arranjo de antenas pode ser separado em duas partes, uma que trata do arranjo horizontal isto é : a manipulação da quantidade das faces do sistema e outra que trata do arranjo vertical isto é: a manipulação da quantidade dos níveis de empilhamento do sistema. O diagrama e o ganho da antena (arranjo) resultante irá aproximar muito bem o diagrama e o ganho obtido à partir da análise dos arranjos horizontal e vertical separadamente.

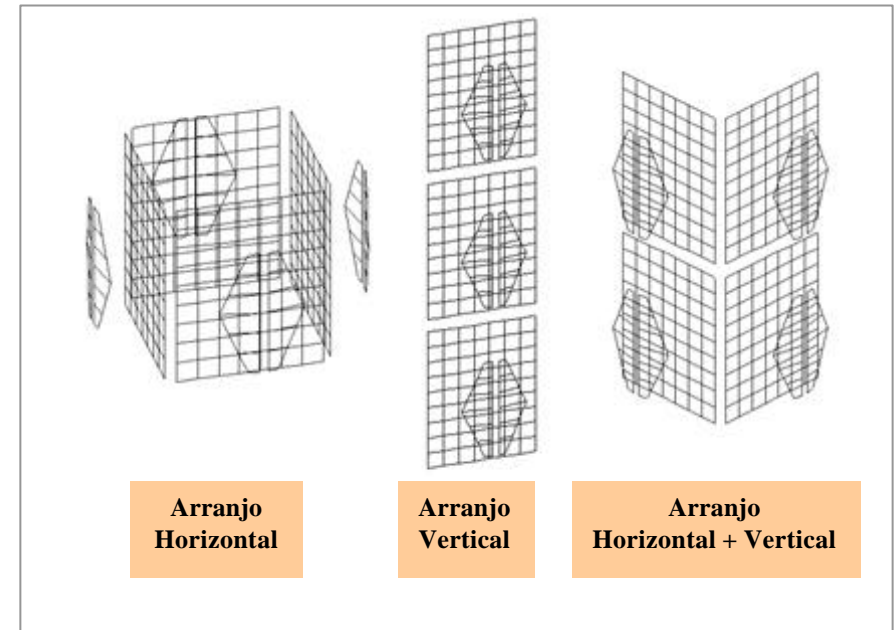


Figura 45 – Tipos

A Fig. 45 apresenta três ilustrações dos possíveis tipos de arranjo que ocorrem na prática.

À esquerda tem-se um arranjo de painéis H ao redor das quatro faces de uma torre, existe neste caso o interesse pela manutenção do diagrama vertical (elevação) do elemento básico do arranjo e a geração de um novo diagrama horizontal (azimute) que seja diferente do diagrama horizontal do elemento básico do arranjo, logo tem-se por definição um arranjo horizontal o que implicará na manipulação do ganho horizontal ou ganho de azimute desta nova antena.

Ao centro temos o empilhamento vertical de 3x painéis H ao longo da face de uma torre, existe neste caso o interesse pela manutenção do diagrama horizontal do elemento básico do arranjo e a geração de um novo diagrama vertical que seja diferente do diagrama vertical do elemento básico do arranjo, logo tem-se por definição um arranjo vertical o que implicará na manipulação do ganho vertical ou ganho de elevação desta nova antena.

À direita tem-se um arranjo de painéis H em duas faces com dois níveis de empilhamento vertical por face, existe neste caso o interesse pela geração de diagramas de radiação horizontal e vertical que sejam diferentes dos diagramas nativos do elemento básico do arranjo, logo tem-se por definição um arranjo combinado horizontal + vertical o que implicará na manipulação simultânea dos ganhos de azimute e de elevação desta nova antena.

Embora a ilustração tenha utilizado a representação de painéis H, o conceito é genérico e pode ser aplicado para qualquer tipo de antena.

• *Graus de Liberdade vs. Tipo de arranjo*

# faces	↔	arranjo H
# níveis	↔	arranjo V
# níveis por face	↔	arranjo composto (H+V)
potência por elemento	↔	arranjo H / V / (H+V)
fase por elemento	↔	arranjo H / V / (H+V)
disposição mecânica	↔	arranjo H / V / (H+V)

Figura 46 – Graus de Liberdade vs. Tipo de arranjo

Trabalhar com arranjo de antenas significa liberdade e flexibilidade para atingir as especificações de antena requeridas pelo projeto de viabilidade técnica da emissora.

Emprega-se invariavelmente solução com arranjo aonde existem restrições de montagem na torre e/ou restrições de cobertura, pois nestes casos as especificações nativas de antenas padrão não são suficientes para lidar com estas restrições.

Como parte integrante de um arranjo de antenas existe necessariamente um sistema de distribuição de potência, responsável por garantir as potências e fases projetadas por elemento além de estar dimensionado para garantir o casamento de impedância do arranjo com a linha de transmissão e suportar a potência de entrada especificada para o sistema.

Como listado na Fig. 46, os diversos graus de liberdade relacionados como:

Quantidade de faces

Quantidade de níveis

Quantidade de níveis pôr face

Potência e fase pôr elemento

Disposição mecânica do elemento

podem ser manipulados ou não de acordo com a arquitetura escolhida para o arranjo, isto é se o mesmo trata-se de um arranjo horizontal, vertical ou horizontal + vertical.

O grau de liberdade “disposição mecânica” refere-se à situação de montagem individual de cada antena do arranjo, onde pode-se operar deslocamentos mecânicos no sentido horizontal e/ou vertical, bem como recuos, afastamentos e inclinações mecânicas com relação às faces da torre.

Exemplos :

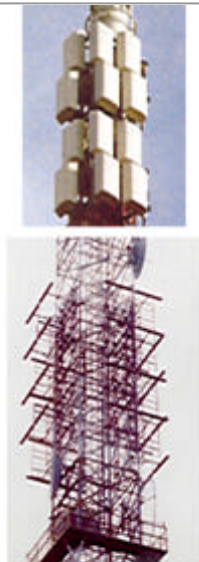
Arranjo
HorizontalArranjo
VerticalArranjo
Horizontal + Vertical

Figura 47 – Exemplos

À esquerda da Fig. 47 tem-se a foto de dois arranjos empilhados sobre um mesmo mastro, no topo um arranjo de duas faces de painéis faixa larga de UHF, abaixo o arranjo de duas faces com dois níveis pôr face de painéis de VHF banda alta. Em ambos os arranjos foi aplicado tilt mecânico.

No centro da Fig. 47 tem-se a foto de um arranjo vertical de dois níveis de supertornstiles de VHF banda baixa.

À direita da Fig. 47, a foto superior mostra um arranjo composto horizontal + vertical de painéis faixa larga UHF com a aplicação do grau de liberdade “disposição mecânica” conforme a definição apresentada na figura anterior. Abaixo tem-se a foto de um arranjo de quatro faces com dois níveis pôr face de antenas tipo painel dipolos de VHF banda baixa.

- *Arranjo Horizontal*

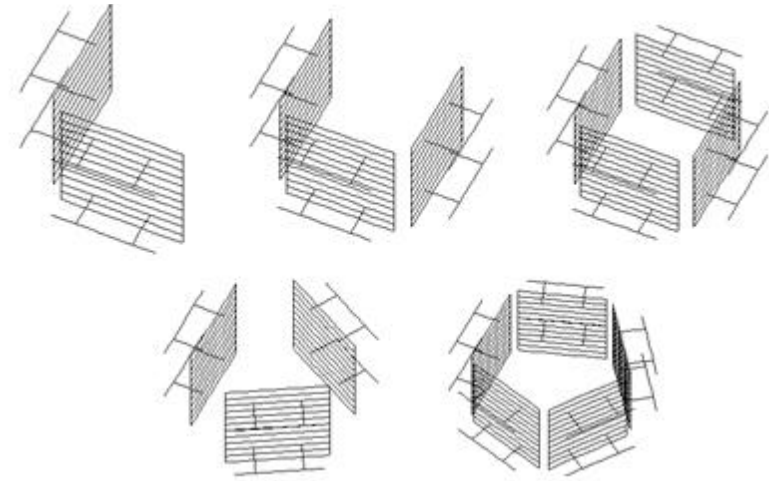


Figura 48 – Horizontal

Nas próximas figuras serão exercitados os vários graus de liberdade oferecidos por arranjo de antenas do tipo horizontal.

Arranjos horizontais são, na maioria das vezes, desenhados à partir da situação mecânica da torre disponível para alojar as antenas; o mais usual é o emprego de antenas separadas axialmente de 90 graus, em geometrias de 2, 3 ou 4 faces como ilustradas na parte superior da Fig. 48, entretanto conformações do tipo triângulo (separação axial em 120 graus) ou pentágono (separação axial em 72 graus) podem ser imaginadas, bem como outras.

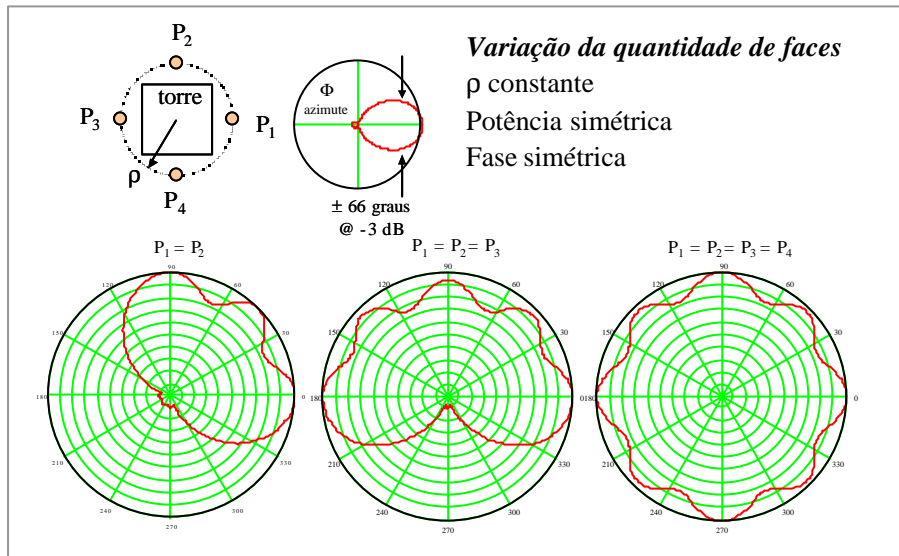


Figura 49 – Varição da quantidade de faces

Para tornar a análise despolarizada e representativa dos compromissos que se quer ilustrar, adotar-se-á nas próximas figuras como elemento básico do arranjo horizontal uma antena descrita matematicamente no plano horizontal pela função $\cos^2(\phi)$ e com relação frente-costa de 20 dB, esta antena apresenta HPBWH=66 graus e tem diagrama de radiação de azimute conforme o diagrama polar no centro superior da Fig. 49.

Como geometria básica do arranjo horizontal, será considerado um círculo imaginário de raio ρ centrado ao redor de uma torre e dispostas sobre este círculo imaginário quatro antenas iguais componentes do arranjo segundo as posições e nomenclaturas da ilustração superior esquerda da Fig. 49 (antena 1 @ 0 graus, antena 2 @ 90 graus, antena 3 @ 180 graus e antena 4 @ 270 graus).

Para ensaiar os efeitos da variação da quantidade de faces sobre o diagrama de azimute resultante de um arranjo horizontal deve-se supor ρ constante, distribuição de potência simétrica e fase de alimentação também simétrica (todos os elementos pertencentes ao arranjo alimentados com a mesma potência e fase).

Para o caso de um arranjo de duas faces com separação axial

de 90 graus tem-se $P_1=P_2$, para arranjo de três faces tem-se $P_1=P_2=P_3$ e para quatro faces tem-se $P_1=P_2=P_3=P_4$. Os diagramas de azimute resultantes destes arranjos estão apresentados na parte inferior da Fig. 49, para o caso de 2 ou 3 faces tem-se um diagrama direcional tipo cardióide e para 4 faces o diagrama resultante é do tipo omnidirecional.

Nesta figura foi ilustrado o compromisso do grau de liberdade = “quantidade de faces”.

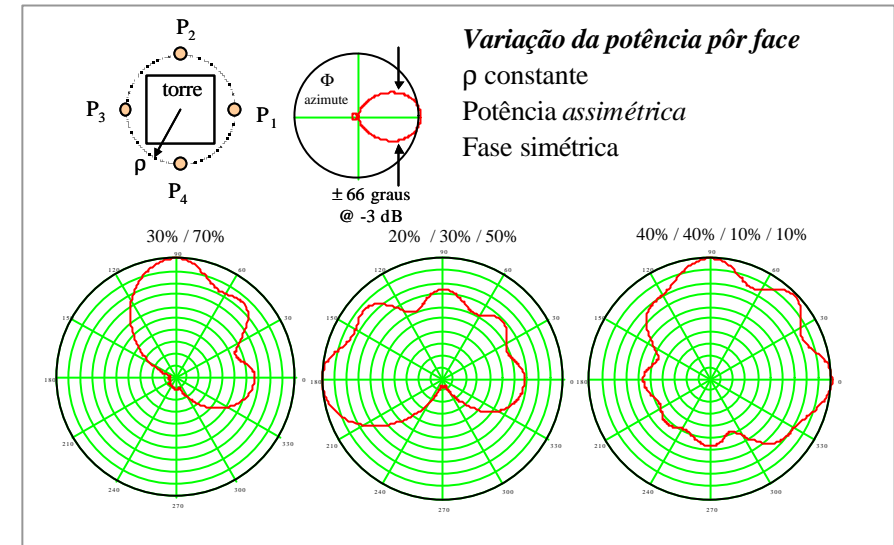


Figura 50 – Varição da potência pôr face

Para ensaiar os efeitos da variação da potência por face sobre o diagrama de azimute resultante de um arranjo horizontal deve-se supor ρ constante e fase de alimentação simétrica, sendo a potência aplicada a cada face o parâmetro de teste.

Para cada situação de 2,3 ou 4 faces foram arbitrados valores de potência distintos para cada uma das faces do arranjo e os diagramas resultantes apresentados na parte inferior da Fig. 50.

Comparando o diagrama de azimute da Fig. 49 anterior para $P_1=P_2$ contra o ensaio de assimetria de potência $P_1=30\%$ e $P_2=70\%$ mostrado na Fig. 50 verifica-se imediatamente a influência deste parâmetro (assimetria de potência) e como o mesmo pode ser útil em

situações onde se deseja otimizar e/ou restringir coberturas em determinadas radiais.

Ensaio de assimetria de potência para 3 faces e para 4 faces também estão apresentados na Fig. 50, e proporcionam uma idéia das variações de cobertura possíveis empregando-se esta técnica.

Nesta figura foi ilustrado o compromisso do grau de liberdade = "potência por elemento".

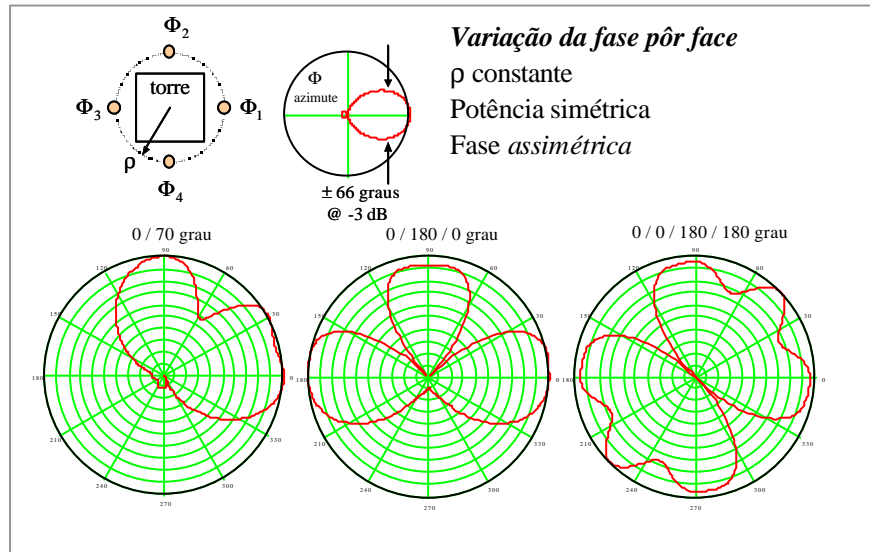


Figura 51 – Variação da fase por face

Para ensaiar os efeitos da variação da fase por face sobre o diagrama de azimute resultante de um arranjo horizontal deve-se supor ρ constante e a potência de alimentação simétrica, sendo a fase de alimentação aplicada a cada face o parâmetro de teste.

Para cada situação de 2,3 ou 4 faces foram arbitrados valores de fase distintos para cada uma das faces do arranjo e os diagramas resultantes apresentados na parte inferior da Fig. 51.

Comparando o diagrama de azimute da Fig. 49 anterior para $P_1=P_2$ contra o ensaio de assimetria de fase $P_1=0$ graus e $P_2=+70$ graus mostrado na Fig. 51 verifica-se imediatamente a influência deste

parâmetro (assimetria de fase) e como o mesmo pode ser útil em situações onde se deseja otimizar e/ou restringir coberturas bem como quando se deseja provocar nulos em determinadas radiais (este último caso é bastante útil para lidar com limitações impostas pelo projeto em situações de operação co-canal).

Ensaio de assimetria de fase para 3 faces e para 4 faces também estão apresentados na Fig. 51, e proporcionam uma idéia das variações de cobertura possíveis empregando-se esta técnica.

Nesta figura foi ilustrado o compromisso do grau de liberdade = "fase por elemento".

Embora não apresentado, torna-se imediato e de fácil compreensão imaginar a infinidade de possíveis combinações e a versatilidade para a síntese de diagramas de radiação de azimute que resultam em se pode operar simultaneamente os valores de potência e de fase de alimentação para cada elemento de um arranjo horizontal, note ainda que até este ponto lidamos com apenas dois graus de liberdade simultaneamente...

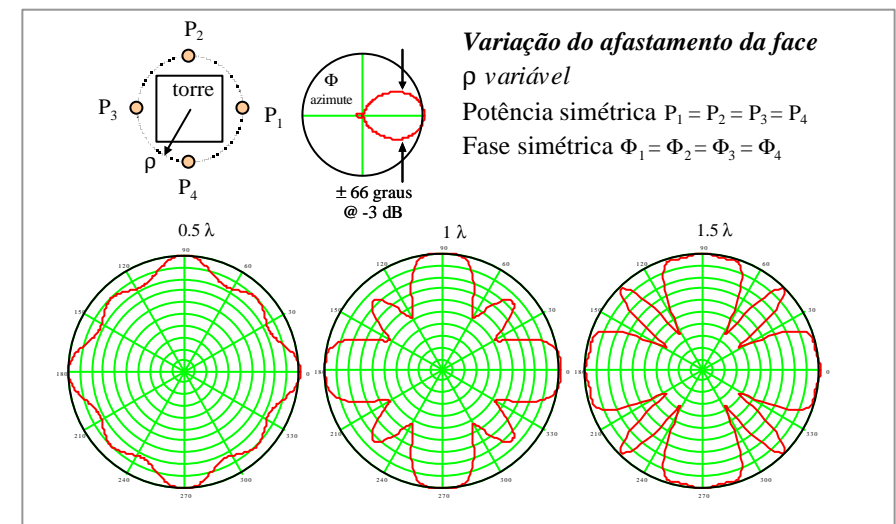


Figura 52 – Variação do afastamento da face

Para ensaiar os efeitos da variação do afastamento dos elementos da face da torre sobre o diagrama de azimute resultante de um arranjo horizontal deve-se supor a potência e a fase de alimentação simétricas, sendo ρ variável o parâmetro de teste.

Para a situação de um arranjo de 4 faces foram arbitrados três valores de afastamento distintos valendo respectivamente 0.5λ , 1λ e 1.5λ entre os elementos do arranjo e o centro da torre, os diagramas resultantes para cada caso estão apresentados na parte inferior da Fig. 52.

Note a deterioração do diagrama omnidirecional, isto é redução de circularidade e surgimento de penetrações no diagrama de azimute à medida que os elementos vão se afastando, o que indica que para antenas de UHF (onde a seção da torre facilmente é do tamanho ou ultrapassa 1l do canal de operação) não é recomendável trabalhar com torres de seção muito grandes e para o caso de antenas de VHF ao redor de torres pequenas deve-se projetá-las mecanicamente para fora, sempre procurando trabalhar ao redor de $r = 0.5 l$ para sintetizar diagramas omnidirecionais.

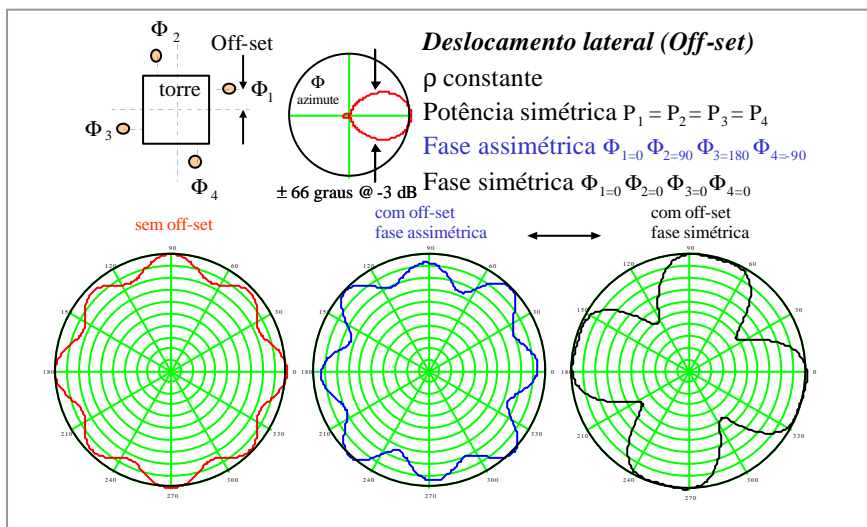


Figura 53 – Deslocamento lateral (Off-set)

Em situações onde a seção da torre é menor mecanicamente do que a dimensão lateral da antena que será instalada nesta seção (situação bastante comum em antenas tipo painel onde a largura do quadro refletor é maior do que a largura da torre) recorre-se ao artifício de instalação de acomodar os elementos do arranjo aplicando-se um ligeiro deslocamento lateral, ou como também denominado “offset mecânico”, aos elementos; a Fig. 53 ilustra esta situação de montagem onde para cada elemento do arranjo operou-se um deslocamento entre o seu centro e o centro da torre, este deslocamento lateral é o “offset”.

Embora esta técnica proporcione um ganho de imediato na ferragem agregada de instalação, independentemente desta situação prática como apresentada, a técnica de “offset” é também e muito mais freqüentemente utilizada para se proporcionar redução de estacionária em um arranjo de antenas quando este arranjo é instalado, pois ocorre que cada antena passa a apresentar individualmente um descasamento de impedância provocado pelas impedâncias mutuas (vide Fig. 15) originadas pelas demais antenas do arranjo e pela própria torre, desequilibrando os divisores de potência e conseqüentemente piorando o VSWR do arranjo. Como será visto na Fig. 54 a seguir, a técnica de “offset” é um recurso empregado em arranjo de antenas para a otimização do VSWR dentro da faixa de operação.

A Fig. 53 apresenta em sua parte inferior os diagramas de azimute resultantes de um arranjo de 4 faces alimentados em simetria de potência e ensaiados, respectivamente, sem offset (diagrama à esquerda), com offset e com o respectivo faseamento dos elementos $\Phi_{1=0} \Phi_{2=90} \Phi_{3=180} \Phi_{4=90}$ (diagrama ao centro) e com offset sem o necessário faseamento dos elementos, isto é $\Phi_{1=0} \Phi_{2=0} \Phi_{3=0} \Phi_{4=0}$ (diagrama à direita). Verifica-se que a montagem com offset não duplica o diagrama omnidirecional gerado pelo arranjo sem offset, bem como caso não seja efetuado a devida compensação de fase o diagrama gerado irá apresentar distorções significativas.

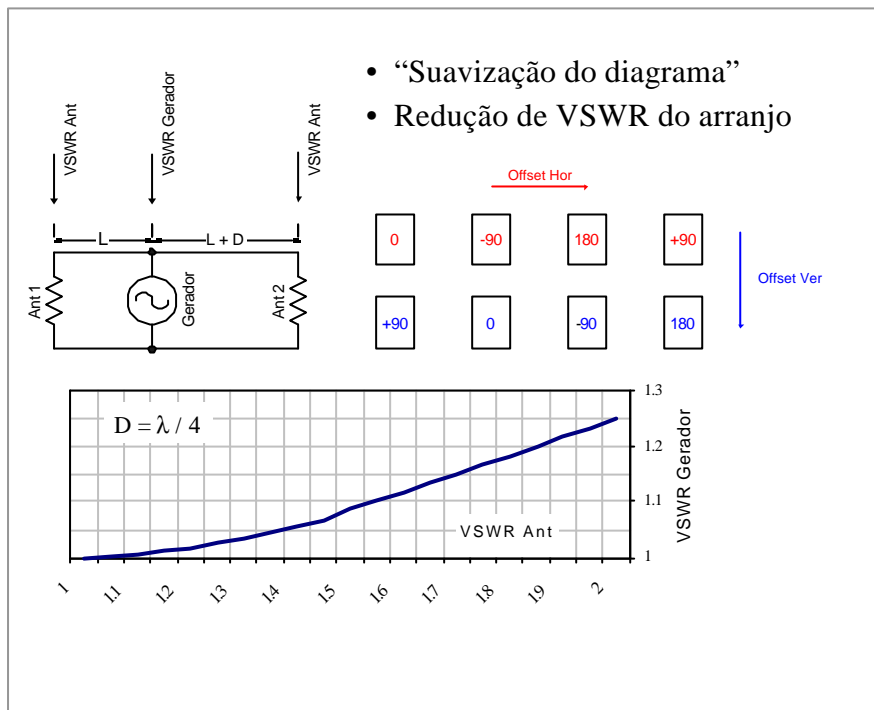


Figura 54 – Offset

Como afirmado na Fig. 53, a técnica de offset é um recurso empregado em arranjo de antenas para a otimização do VSWR dentro da faixa de operação, porém o deslocamento mecânico do eixo do elemento com relação ao eixo da torre deve ser compensado eletricamente nos cabos e esta combinação de efeitos gera, na prática, ligeiras deformações no diagrama de radiação do arranjo que emprega offset.

O diagrama resultante de um arranjo empregando offset somente seria igual ao diagrama resultante de um arranjo sem offset caso os elementos do arranjo apresentassem relação frente-costa infinita e reproduzissem a função $\cos^2(\phi)$, imposições não realizáveis na prática.

Mesmo apresentando compromissos, a técnica de offset entretanto é de grande valia e bastante empregada pois permite, na prática:

Melhorar ligeiramente a circularidade de arranjos omnidirecionais;

Reduzir o VSWR de arranjos de antenas provocados por “build up” de estacionária de cada elemento quando o mesmo entra no arranjo, ou quando condições atmosféricas deterioram o casamento de impedância da antena (frequente em antenas alimentadas de forma balanceada e/ou alta impedância).

A Fig. 54 pretende explicar o mecanismo de redução de VSWR quando se emprega offset, recorrendo ao circuito mostrado no extremo superior esquerdo tem-se duas antenas iguais, denominadas ant1 e ant2 e alimentadas por um mesmo gerador por intermédio de duas linhas de transmissão distintas e de comprimento elétrico L (para ant1) e L+D (para ant2).

Se a diferença de comprimento elétrico entre estas duas linhas, o parâmetro D, é feito $D = \lambda/4$ esta diferença de 90 graus irá se transformar em 180 graus sobre o gerador para a onda refletida em ant2 pôr ocasião de um descasamento de impedâncias sofrido simultaneamente por ant1 e ant2, ora as ondas refletidas de ant1 e ant2 irão somar-se sobre o gerador com uma diferença de fase de 180 graus, cancelando-se teoricamente e “simulando” para o gerador uma situação de VSWR inferior àquela que efetivamente está estabelecida sobre os terminais de cada antena ant1 e ant2.

O gráfico na parte inferior da Fig. 54 mostra o VSWR resultante sobre o gerador versus o VSWR desenvolvido na antena, onde pode-se observar que, por exemplo, com o emprego desta técnica variações de VSWR na antena até 1,6:1 se traduzem em variações no gerador de no máximo 1,1:1.

Esta técnica pode ser empregada tanto para arranjos horizontais como para arranjos verticais conjuntamente (neste caso chamado de “double step phase compensation”) em arranjos complexos; como ilustrado na Fig. 54 se tomarmos como exemplo um arranjo de 4 faces com dois níveis de empilhamento por face e procedermos à aplicação de offset mecânico nos dois níveis alimentando o nível superior com as fases/face indicadas (0, -90, 180,+90) e o nível inferior com as fases/face indicadas

(+90,0,-90,180), deveremos obrigatoriamente alimentar o nível inferior com -90 graus de defasagem com relação ao nível superior para garantir a mesma fase / face para o arranjo como um todo, esta introdução deliberada da defasagem de 90 graus entre o nível superior e nível inferior fará com que o VSWR do divisor 1:2 que alimenta os dois níveis seja inferior àquele caso esta técnica não tivesse sido utilizada.

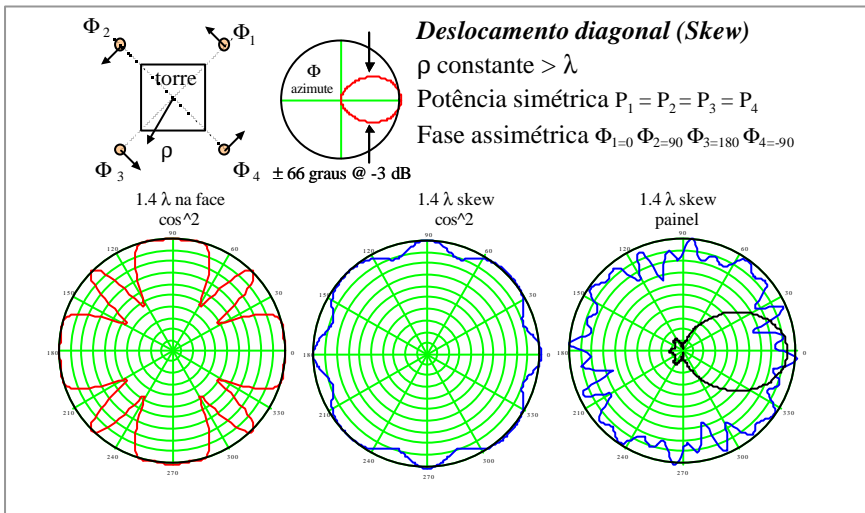


Figura 55 – Deslocamento diagonal

Conforme mostrado na Fig. 52 anteriormente, para o caso de diagramas de azimute do tipo omnidirecional, existe um compromisso ótimo entre a seção transversal da torre e o comprimento de onda de operação do arranjo ao redor desta torre, sendo que diagramas omnidirecionais com baixa circularidade requerem uma seção transversal de torre de, no máximo, 1λ ($\rho < 0.5 \lambda$).

Ocorre entretanto que a disponibilidade de torres e mesmo o espaço em torres disponíveis para a instalação destes arranjos muitas vezes não cumpre estes requisitos e, nestes casos, resta pensar em um aumento da quantidade de faces do arranjo (pôr exemplo 5,6,7 até 8 faces) ou alternativamente empregar a técnica descrita nesta Fig. 55, conhecida como deslocamento diagonal ou “skew”.

Neste tipo de arranjo os elementos são dispostos sobre uma linha imaginária que se projeta passando pelas diagonais da torre, a parte frontal de cada elemento (ou máx do diagrama de radiação do elemento) é apontada na direção perpendicular à esta diagonal e cada elemento alimentado com fase própria conforme ilustração e nomenclatura indicadas no extremo superior esquerdo da Fig. 55.

Para arranjos de 4 elementos com separação axial 90 graus, a formulação matemática desta montagem requer que o elemento do arranjo possua diagrama de azimute conforme a função $\cos^2(\phi)$ e relação frente-costa infinita a fim de se obter o diagrama omnidirecional ótimo, tal elemento deve ter o diagrama de azimute conforme ilustrado no centro superior da Fig. 55.

A Fig. 55 apresenta em sua parte inferior os diagramas de azimute resultantes desta montagem onde à esquerda tem-se, apenas para fins de comparação, o diagrama de azimute associado à um arranjo de 4 faces alimentado em simetria de potência e fase considerando $\rho=1.4 \lambda$ onde pode-se verificar a perda de circularidade e desconformação da característica omnidirecional desejada.

Ao centro pode-se observar o resultado da montagem empregando a técnica descrita de deslocamento diagonal com assimetria de fase ($\Phi_{1=0} \Phi_{2=90} \Phi_{3=180} \Phi_{4=-90}$), sendo o diagrama obtido perfeitamente omnidirecional com circularidade equivalente às situações de $\rho=0.5\lambda$ (vide Fig. 52).

À direita está apresentado o diagrama resultante para o caso pratico de se utilizar uma antena tipo painel de dipolos de VHF banda alta (canal 7 até 13) nesta configuração de deslocamento diagonal, onde nota-se a deterioração da circularidade (embora tendo sido mantido a característica omnidirecional do diagrama) provocada pelos desvios do ângulo de meia potência e da relação frente-costa finita desta antena realizável comparativamente à antena ideal considerada na formulação matemática para a solução ótima do problema.

Nesta figura e nas anteriores 54, 53 e 52 foram ilustrados os compromissos do grau de liberdade = “disposição mecânica do elemento”.

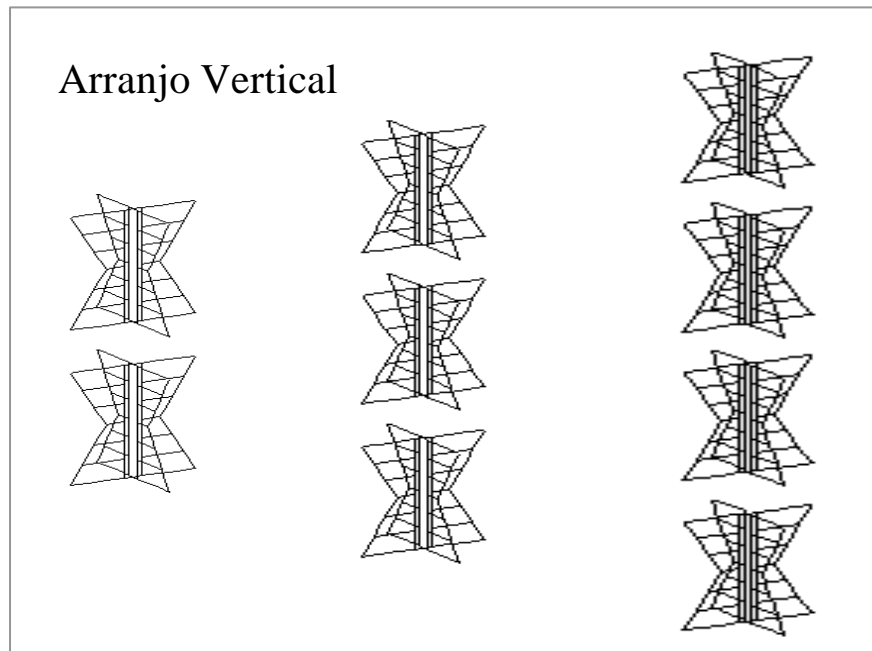


Figura 56 – Vertical

Nas próximas figuras serão exercitados os vários graus de liberdade oferecidos por arranjo de antenas do tipo vertical.

Como ilustrado na Fig. 56 esta categoria de arranjo é criada pelo empilhamento vertical de, pelo menos, dois elementos (ou também denominado dois níveis) podendo, em tese, atingir qualquer quantidade de elementos, embora na prática em antenas de radiodifusão para FM e TV não seja usual empregar-se mais do que 24 elementos empilhados verticalmente (situação de uma antena slot de UHF com 24 fendas por exemplo).

A configuração e possíveis variantes de arranjos verticais não apresentam uma “amarração” com a geometria da torre como ocorre com arranjos horizontais que, por uma questão de facilidade de instalação, procuram “vestir” a torre em conformidade com a quantidade de faces da própria torre (vide Fig. 48); em arranjos verticais o empilhamento projeta-se acima do topo da torre ou projeta-se em paralelo e ao longo da altura na face da torre.

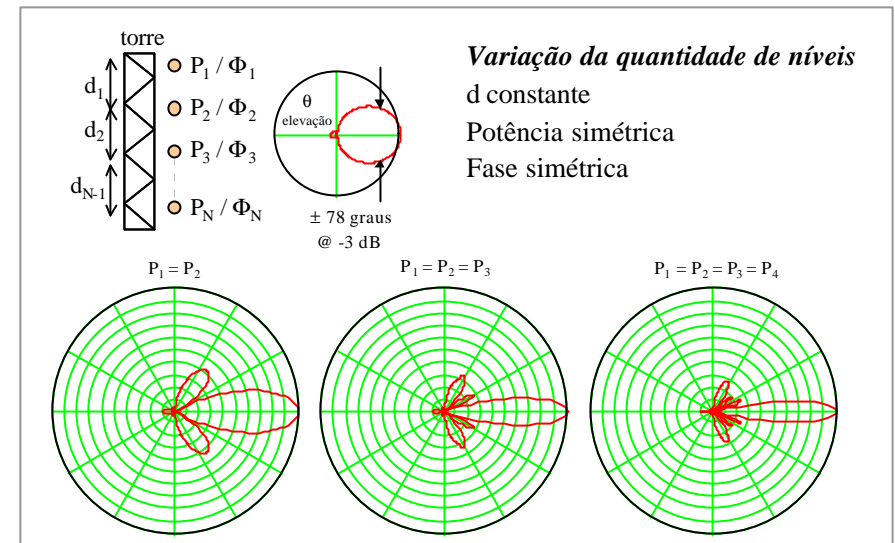


Figura 57 – Variação da quantidade de níveis

Para tornar a análise despolarizada e representativa dos compromissos que se quer ilustrar, adotar-se-á nas próximas figuras como elemento básico do arranjo vertical uma antena descrita matematicamente no plano vertical como um dipolo de meia-onda e com relação frente-costa de 20 dB, esta antena apresenta HPBWV=78 graus e tem diagrama de radiação de elevação conforme o diagrama polar no centro superior da Fig. 57.

Como geometria básica do arranjo vertical, será considerado um empilhamento vertical de N elementos básicos separados entre si pelas distâncias d_i ($i = 1...n$) e alimentados com potência P_i ($i = 1...n$) e fase ϕ_i ($i = 1...n$) segundo a disposição e a nomenclatura da ilustração superior esquerda da Fig. 57.

Para ensaiar os efeitos da variação da quantidade de níveis sobre o diagrama de elevação resultante de um arranjo vertical deve-se supor d constante (separação uniforme), distribuição de potência simétrica e fase de alimentação também simétrica (todos os elementos pertencentes ao arranjo alimentados com a mesma potência e fase).

Para o caso de um arranjo de dois níveis tem-se $P_1=P_2$, para

arranjo de três níveis tem-se $P_1=P_2=P_3$ e para quatro níveis tem-se $P_1=P_2=P_3=P_4$. Os diagramas de elevação resultantes destes arranjos estão apresentados na parte inferior da Fig. 57 em formato polar, note que à medida que se aumenta a quantidade de níveis o diagrama de elevação ou diagrama vertical vai de fechando em torno do horizonte, isto é o ganho vertical do arranjo vai aumentando e vão surgindo lóbulos secundários em quantidade proporcional aos elementos empilhados e com amplitudes variáveis, o nível do lóbulo traseiro se mantém.

Nesta figura foi ilustrado o compromisso do grau de liberdade = “quantidade de níveis”.

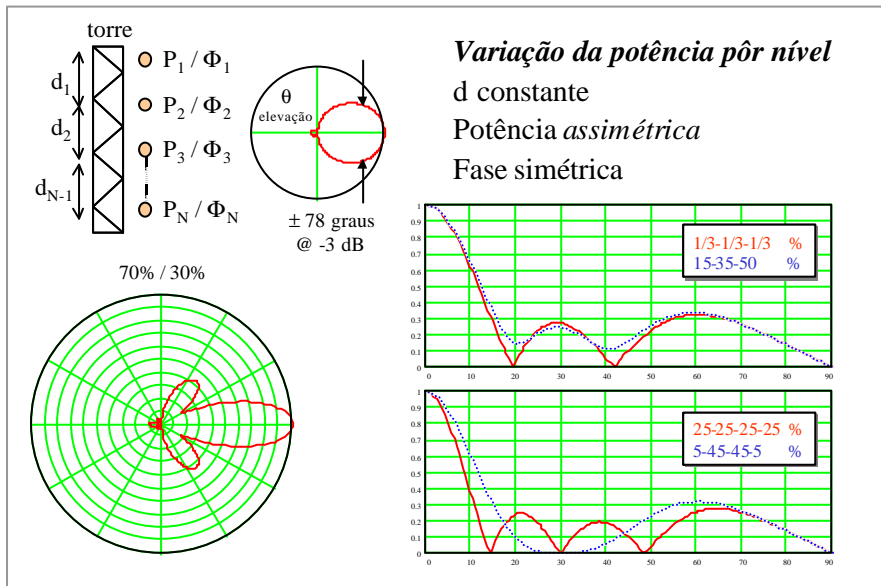


Figura 58 – Variação da potência por nível

Para ensaiar os efeitos da variação da potência por nível sobre o diagrama de elevação resultante de um arranjo vertical deve-se supor d constante (separação uniforme) e fase de alimentação simétrica, sendo a potência aplicada a cada nível o parâmetro de teste.

Para cada situação de 2,3 ou 4 níveis de empilhamento foram arbitrados valores de potência distintos para cada um dos níveis do arranjo e os diagramas resultantes estão apresentados em formato polar

(para dois níveis) e em formato retangular (para três e quatro níveis) na parte inferior da Fig. 58.

Para os diagramas em formato retangular são sobrepostos o diagrama resultante da aplicação de potência simétrica (em vermelho) com o diagrama resultante da aplicação de potências assimétricas (em azul) a fim de se melhorar visualizar as implicações deste parâmetro de teste.

Para o caso de 2 e de 3 níveis de empilhamento a distribuição assimétrica de potência possibilitou o preenchimento de nulos (ou “null fill”), com a manutenção da quantidade dos lóbulos laterais. Para o caso de 4 níveis de empilhamento a assimetria de potência adotada segundo a lei de distribuição binomial permitiu eliminar completamente 2 dos 3 lóbulos laterais, às custas porém de uma redução do ganho de elevação do arranjo (vide o alargamento do ângulo de meia potência vertical para o arranjo alimentado segundo a lei binomial onde $P_1=5\%$, $P_2=45\%$, $P_3=45\%$, $P_4=5\%$).

Nesta figura foi ilustrado o compromisso do grau de liberdade = “potência por nível”.

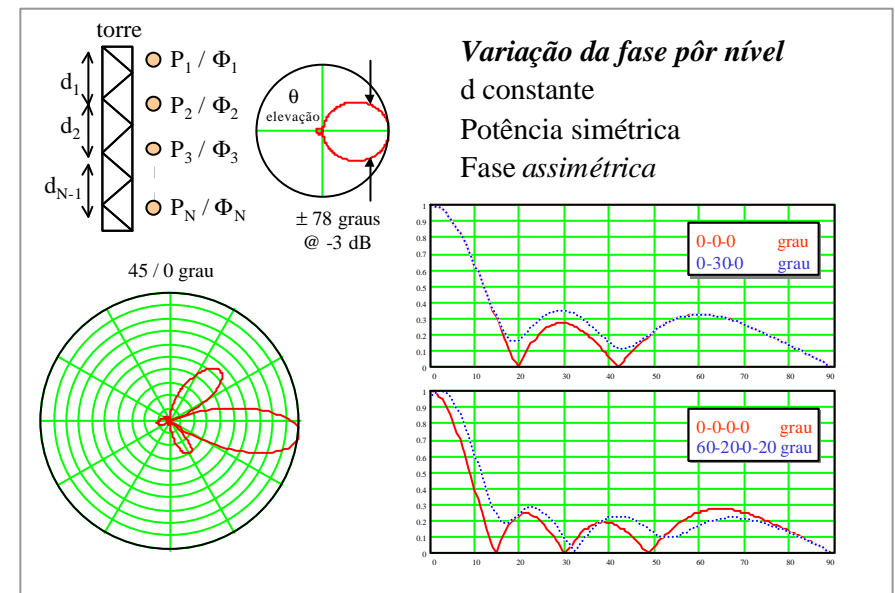


Figura 59 – Variação da fase por nível

Para ensaiar os efeitos da variação da fase por nível sobre o diagrama de elevação resultante de um arranjo vertical deve-se supor d constante (separação uniforme) e potência de alimentação simétrica, sendo a fase aplicada a cada nível o parâmetro de teste.

Para cada situação de 2,3 ou 4 níveis de empilhamento foram arbitrados valores de fase distintos para cada um dos níveis do arranjo e os diagramas resultantes estão apresentados em formato polar (para dois níveis) e em formato retangular (para três e quatro níveis) na parte inferior da Fig. 59.

Para os diagramas em formato retangular são sobrepostos o diagrama resultante da aplicação de fase simétrica (em vermelho) com o diagrama resultante da aplicação de fases assimétricas (em azul) a fim de se melhorar visualizar as implicações deste parâmetro de teste.

Para o caso de 2 níveis de empilhamento a distribuição assimétrica de fase possibilita a incorporação de inclinação elétrica (ou “beam tilt”), com o conseqüente aumento da amplitude dos lóbulos laterais e redução de ganho de elevação do arranjo. Para o caso de 3 níveis de empilhamento pode-se trabalhar o preenchimento de nulos (como também era possível com a distribuição assimétrica de potência- vide Fig. 58) e para 4 níveis de empilhamento consegue-se trabalhar tanto a inclinação elétrica como o preenchimento de alguns nulos simultaneamente.

Nesta figura foi ilustrado o compromisso do grau de liberdade = “fase por nível”.

Para ensaiar os efeitos da variação da separação entre níveis sobre o diagrama de elevação resultante de um arranjo vertical deve-se supor potência e fase de alimentação simétrica, sendo a separação d entre níveis o parâmetro de teste.

Para cada situação de 2,3 ou 4 níveis de empilhamento foram arbitrados valores de separação entre níveis distintos e os diagramas resultantes estão apresentados em formato polar (para dois níveis) e em formato retangular (para três e quatro níveis) na parte inferior da Fig. 60.

Para os diagramas em formato retangular são sobrepostos o diagrama resultante da aplicação da separação uniforme (em vermelho) com o diagrama resultante da aplicação de separação não uniforme (em

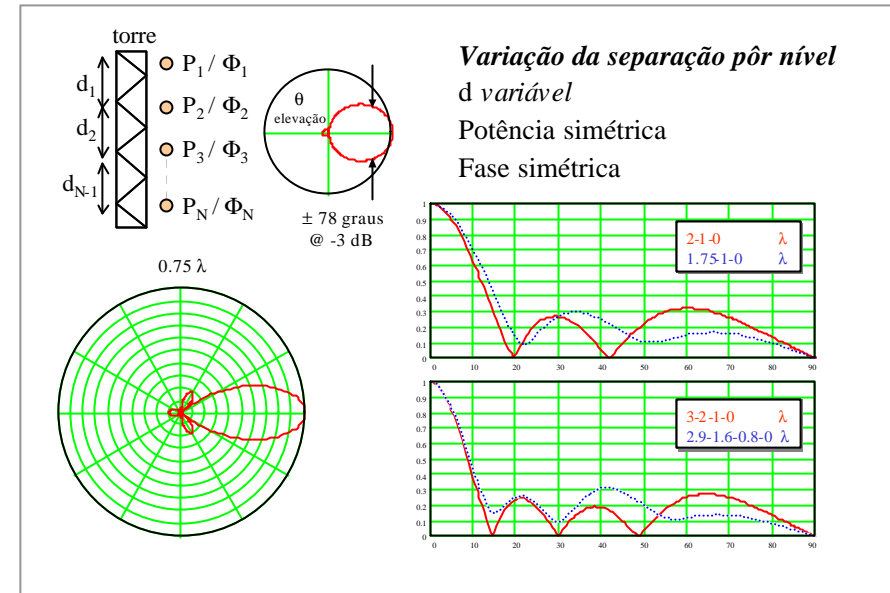


Figura 60 – Variação da separação por nível

azul) a fim de se melhorar visualizar as implicações deste parâmetro de teste.

Para o caso de 2 níveis, o emprego de separação diferente de 1 comprimento de onda permite aumentar ou reduzir os lóbulos secundários. Para o caso de 3 ou 4 níveis de empilhamento consegue-se trabalhar o preenchimento de nulos preservando-se o HPBWV e a amplitude dos lóbulos laterais bem com a redução daqueles mais afastados do lóbulo principal.

Para ensaiar os efeitos da variação do afastamento de cada nível do arranjo (avanço ou recuo em relação à linha imaginária que determina a colinearidade dos elementos) sobre o diagrama de elevação resultante de um arranjo vertical, deve-se supor potência e fase de alimentação simétricas bem como a separação d entre níveis uniforme. Recorrendo à ilustração superior esquerda da Fig. 61 verifica-se que tal afastamento caracteriza-se como um “offset” mecânico do

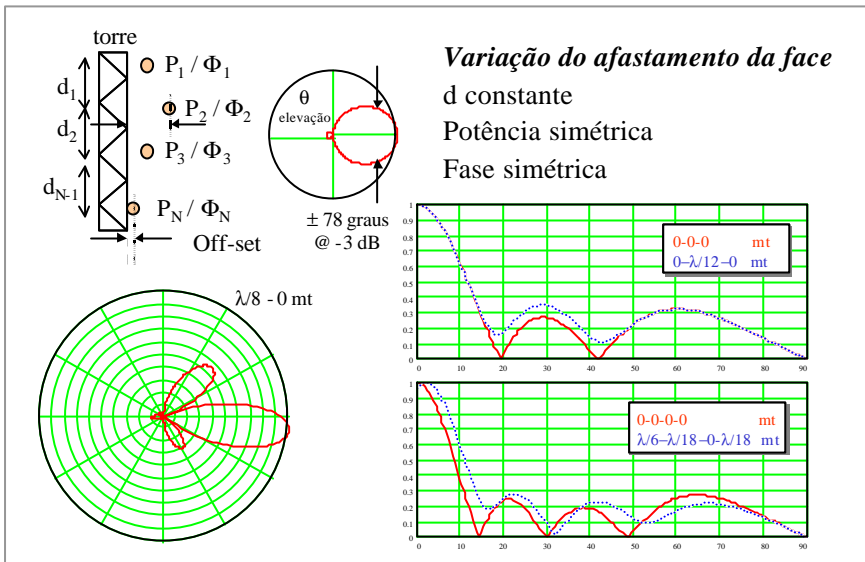


Figura 61 – Variação do afastamento da face

elemento do arranjo com relação à uma linha imaginária de colinearidade que centralizaria todos os elementos, portanto um conceito semelhante àquele apresentado na Fig. 53 anterior.

Uma análise mais atenta desta variante de montagem permite concluir que esta técnica tem o efeito de provocar uma variação da fase pôr nível como já apresentado na Fig. 59 anterior, pois o afastamento ou aproximação de cada nível do arranjo com relação à torre é equivalente a uma incorporação de fase neste nível com relação aos demais; a conversão entre o afastamento mecânico e a fase de alimentação é imediata pois um deslocamento de lambda implica em variação de 360 graus, se o deslocamento é da linha de colinearidade para trás (em direção à torre) isto equivale a atrasar a fase deste elemento com relação aos demais e vice versa.

O diagrama polar da Fig. 61 corresponde a um arranjo de dois níveis de empilhamento e é obtido pela projeção mecânica do elemento superior para a frente da linha de colinearidade pelo valor de $\lambda/8$, note

que $\lambda/8 = 45$ graus e portanto esta situação é exatamente igual àquela mostrada no diagrama polar da Fig. 59.

Para 3 e 4 níveis de empilhamento os diagramas retangulares da Fig. 61 reproduzem a mesma situação daqueles apresentados na Fig. 59 anterior, porem neste caso o que provocou a defasagem foi o deslocamento mecânico de cada nível proporcionado por esta técnica.

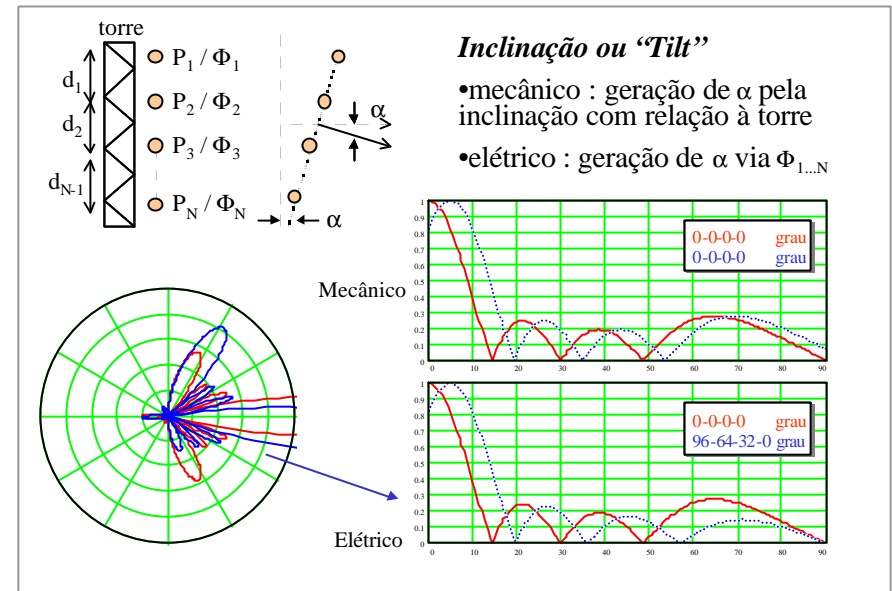


Figura 62 – Inclinação ou “Tilt”

O empilhamento vertical de antenas em um arranjo possibilita o emprego da técnica de inclinação de feixe ou ‘tilt’ que nada mais é do que inclinar o lóbulo principal do diagrama de elevação para abaixo da linha do horizonte. Quando o máximo do diagrama de elevação é deslocado para α graus abaixo da linha do horizonte diz-se que o sistema apresenta tilt de α graus.

Existem duas formas de se provocar inclinação de feixe em arranjos verticais, classificadas como:
 Inclinação elétrica ou tilt elétrico
 Inclinação mecânica ou tilt mecânico

O extremo superior esquerdo da Fig. 62 ilustra duas situações de montagem típicas para arranjos verticais, a situação de disposição mecânica em colinearidade onde os elementos estão alinhados verticalmente e centrados sobre uma linha imaginária configura o emprego típico da técnica de tilt elétrico, já a situação de disposição mecânica onde a linha de colinearidade sofre uma inclinação mecânica e projeta todo o arranjo em ângulo configura o emprego da técnica de tilt mecânico.

No caso de se empregar tilt elétrico a inclinação de α graus se dá pela manipulação das fases $\Phi_{1...N}$ dos elementos do arranjo e no caso de se empregar tilt mecânico a inclinação de α graus se dá pela inclinação mecânica de α graus da linha de colinearidade do arranjo.

O diagrama polar da Fig. 62 mostra uma ampliação dos lóbulos secundários de um arranjo de quatro níveis, onde o diagrama em vermelho representa o arranjo sem tilt e o diagrama em azul o arranjo com tilt elétrico, note o aumento de alguns lóbulos secundários para este último caso (incorporação do tilt elétrico), o diagrama retangular desta situação está também ilustrado ao lado para fins de comparação.

Acima deste diagrama retangular, a Fig. 62 ainda mostra a sobreposição de, novamente, em vermelho o arranjo sem tilt e em azul o arranjo com tilt mecânico, note neste caso que o diagrama de elevação de um arranjo com tilt mecânico trata-se do diagrama de elevação do arranjo sem tilt deslocado à direita por tantos graus quanto for o ângulo de tilt.

O tilt mecânico é mais indicado quando se dispõe de diagramas direcionais e o tilt elétrico quando se dispõe de diagramas omnidirecionais, sendo que neste último caso o aumento de amplitude de alguns lóbulos secundários sempre irá provocar uma redução do ganho de elevação do arranjo (tipicamente de alguns décimos de dB).

O tilt mecânico, embora não distorça o diagrama de elevação, não é indicado quando a antena é do tipo omnidirecional, pois a parte de trás da antena estará radiando para acima da linha do horizonte e poderá implicar em problemas de cobertura.

Nesta figura e nas anteriores 61 e 60 foram ilustrados os compromissos do grau de liberdade = “disposição mecânica do elemento”.

Por último, resta dizer que pode-se aplicar simultaneamente as técnicas de tilt elétrico com tilt mecânico em arranjos onde se deseje operar com valores elevados de α .