



PRINCÍPIOS DE RADAR

# ***FUNDAMENTOS DO RADAR***

## **CAPÍTULO 2**

**OSWALDO MASSAMBANI, Ph.D.**

Professor Titular

Departamento de Ciências Atmosféricas

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

Universidade de São Paulo

São Paulo – Brasil

**Texto básico para a disciplina Meteorologia com Radar**

Departamento de Ciências Atmosféricas

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas- IAG-USP

Universidade de São Paulo



PRINCÍPIOS DE RADAR

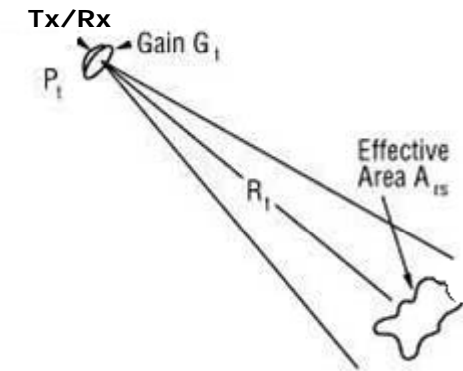
# A EQUAÇÃO DO RADAR



PRINCÍPIOS DE RADAR

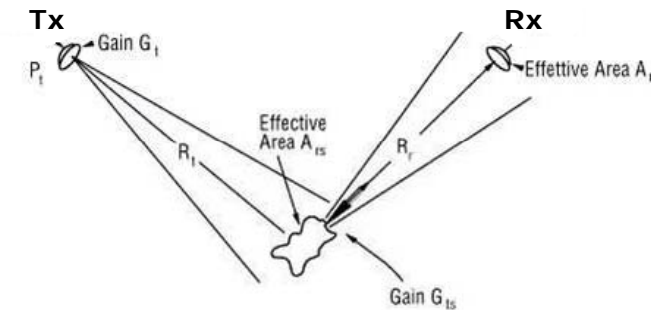
## RADAR MONOESTÁTICO

A configuração mais comum de um sistema de radar, com o receptor do radar no mesmo local do transmissor. Neste sistema, superfícies de alcance constantes são esferas com centro no radar, e somente a componente radial da velocidade do alvo causa uma mudança na frequência Doppler



## RADAR BIESTÁTICO

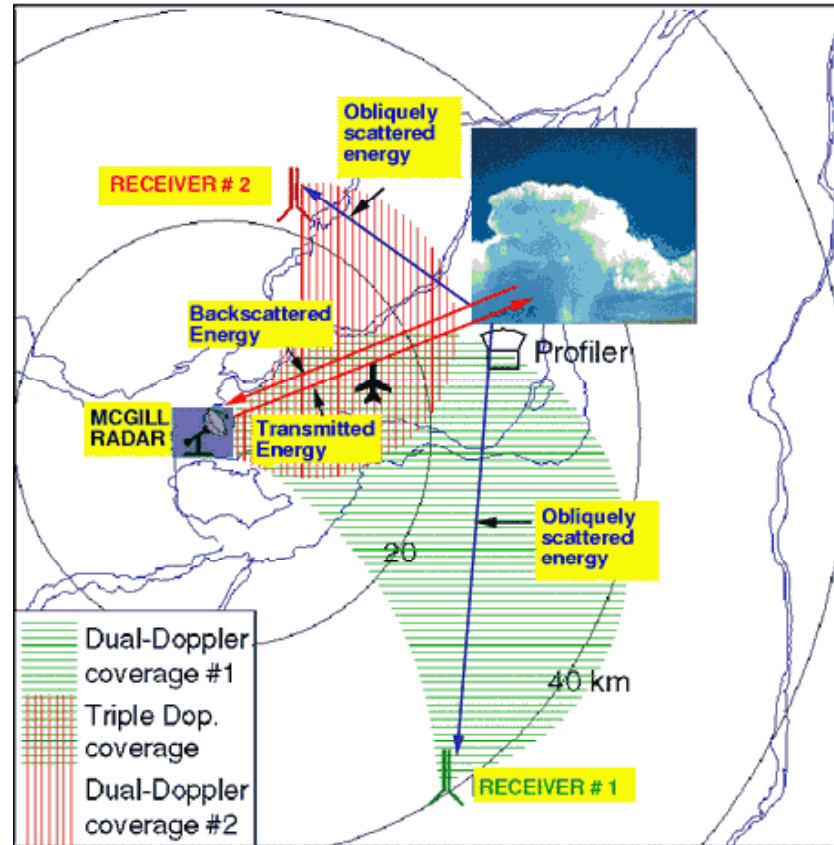
Uma configuração de sistema de radar com o receptor localizado em um local diferente do transmissor. Neste sistema, superfícies de alcance constante são elipsóides com os focos localizados nas posições do transmissor e receptor, e a componente da velocidade do alvo induz uma mudança na frequência Doppler é a componente normal aos elipsóides.





PRINCÍPIOS DE RADAR

## EXEMPLO DE RADAR BIESTÁTICO





PRINCÍPIOS DE RADAR

O conceito do receptor biestático para radar meteorológico foi desenvolvido por Joshua Wurman no National Center for Atmospheric Research.

Nesse sistema, um simples e tradicional radar monoestático transmite um feixe estreito e recebe radiação espalhada de volta enquanto um ou mais receptores biestáticos passivos recebem de forma oblíqua a radiação espalhada.

Devido à multiplicidade de ângulos de vistas, diversos componentes do vento podem ser medidos simultaneamente. Isto permite a possibilidade de se medir um perfil 3-D com um único sistema de radar.

Como parte de um esforço colaborativo entre a Universidade de Oklahoma, o pessoal do NCAR, e McGill, nós operamos dois receptores biestático, um instalado a 40km sudeste do radar e o outro a 23km nordeste.

Ambos receptores estão ajustados para receber radiação espalhada de forma oblíqua do sistema de banda S em um ângulo de aproximadamente  $70^\circ$ . Esta configuração permite cobertura múltipla de Doppler cobrindo o Greater Montreal, incluindo o aeroporto Dorval.

A combinação de um sistema principal de radar com receptores biestáticos é usada para auxiliar nosso trabalho de recuperação, ambos como verificação de um único radar dos perfis de vento assim como para a termodinâmica.

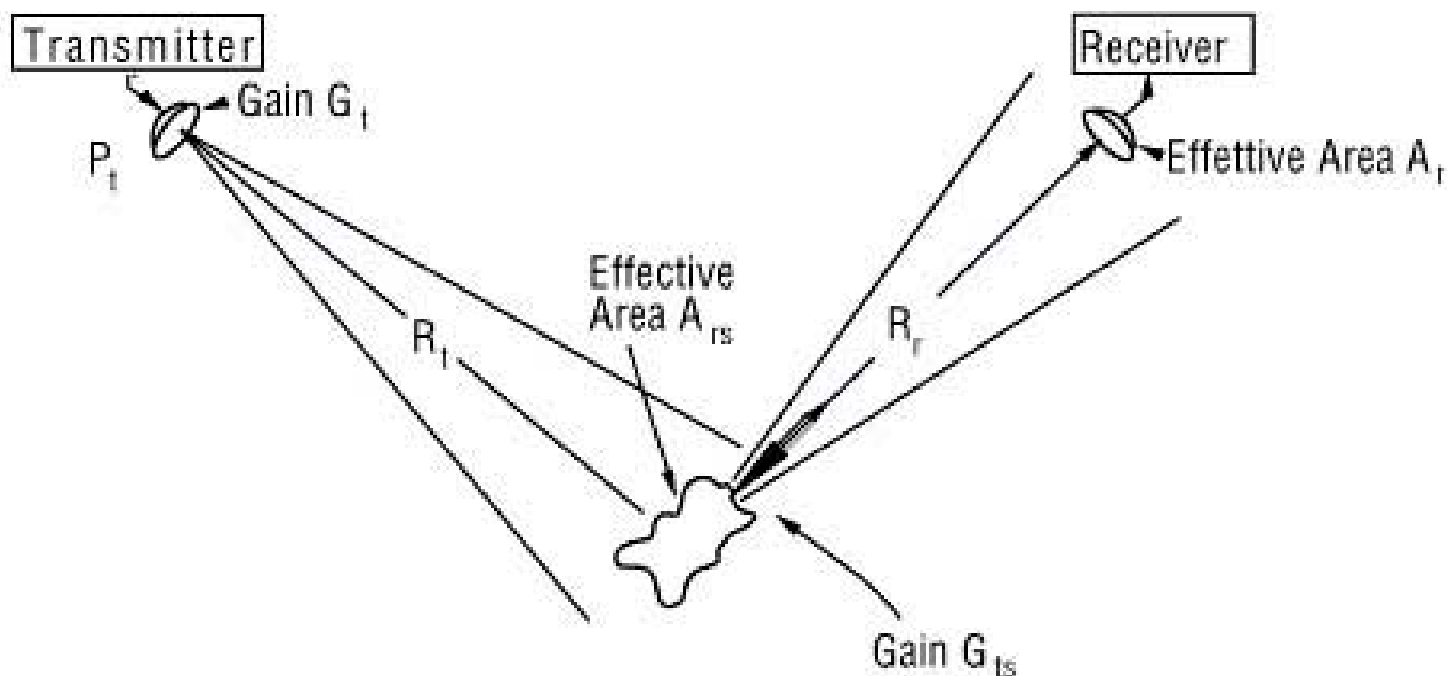
Além disso, a excelente cobertura sobre o aeroporto poderia melhorar a detecção de tempo severo que assustam as linhas aéreas como downbursts.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## DENSIDADE DE FLUXO DE ENERGIA INCIDENTE EM UM ALVO

Considere um sistema de radar iluminando um alvo distante, como na figura seguinte. Assume-se que o alvo está longe o suficiente para permitir que a onda incidente é uma onda plana. Assume-se também que o alvo é pequeno o suficiente podendo ser considerado como um alvo ponto. Assume-se que a onda incidente é linearmente polarizada.





PRINCÍPIOS DE RADAR

A relação fundamental entre as características do radar, o alvo, e o sinal recebido é chamada de relação fundamental.

A geometria de espalhamento de um alvo de radar isolado (espalhador) é mostrado na figura, com os parâmetros que estão na equação do radar.

Quando uma energia  $P_t$  é transmitida por uma antena com ganho  $G_t$ , a energia por unidade de ângulo sólido na direção do espalhador é  $P_t G_t$ , onde o valor de  $G_t$  naquela direção é usado.

No espalhador,

$$S_s = (P_t G_t) \left( \frac{1}{4\pi R^2} \right)$$

Onde  $S_s$  é a densidade de energia no espalhador. O ganho efetivo  $G_t$  da antena transmissora do radar é definido como a razão do fluxo de energia em questão incidente no alvo, e a densidade do fluxo de energia se não houvesse nenhuma perda, se uma antena omnidirecional fosse usada.

Perda do espalhamento

$$\frac{1}{4\pi R^2}$$

é a redução na densidade de energia associada com o espalhamento da energia sobre uma esfera de raio  $R$  n power density associated with spreading of the power over a sphere of radius  $R$  ao redor da antena.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Para obter a energia total interceptada pelo espalhador, a densidade de energia deve ser multiplicada pela área efetiva de recepção do espalhador.

$$P_{ts} = S A_{rs}$$

Note que a área efetiva  $A_{rs}$  não é a área do feixe incidente interceptada pelo espalhador, porém é a área efetiva;

i.e., é a área do feixe incidente da qual toda energia seria removida se fosse assumido que toda a energia ao longo do feixe fosse ininterrupta.

O valor real de  $A_{rs}$  depende na efetividade do espalhador como uma antena receptora.

Uma parte da energia recebida pelo espalhador é absorvida e perdida, a não ser que o espalhador seja um perfeito condutor ou um perfeito isolante; o resto é radiado em várias direções. A fração absorvida é  $f_a$ , então a fração radiada é  $1 - f_a$ , e a energia total radiada é

$$P_{tr} = P_{ts}(1 - f_a)$$





PRINCÍPIOS DE RADAR

A condução e disposição da corrente que flui no espalhador resulta na radiação re-emitida que tem um padrão (como um padrão da antena). Note que a área de recebimento efetiva do espalhador é função da sua orientação relativa ao feixe incidente, então entende-se de  $A_{re}$  na equação acima que deve ser aplicado somente para a direção do feixe incidente.

O padrão da radiação re-emitida talvez não seja o mesmo como o padrão  $A_{re}$ , e o ganho na direção do receptor é o valor relevante no padrão de re-emissão da radiação.

Então,

$$S_r = P_t G_t \frac{1}{4\pi R^2}$$

onde  $P_t$  é a potência total re-emitida,  $G_t$  é o ganho do espalhador na direção do receptor, e

$$\frac{1}{4\pi R^2}$$

é o fator de espalhamento da radiação re-emitida



PRINCÍPIOS DE RADAR

Note que a maior diferença entre o link de comunicação e o espalhamento do radar é aquela que o link de comunicação tem apenas um fator de espalhamento, enquanto o radar tem dois.  
Então, se  $R_r = R_t$ , a distância total é  $2R_t$ ;

para um link de comunicação com esta distância, o fator de espalhamento é somente:

$$1/4 \left( \frac{1}{4\pi R_r^2} \right)$$

visto que para o radar é:

$$\left( \frac{1}{4\pi} \right)^2 \left( \frac{1}{R_r} \right)^4$$

Então, a perda por espalhamento para um radar é muito maior que para um link de comunicação com o mesmo comprimento total de caminho.



PRINCÍPIOS DE RADAR

A energia entrando no receptor é: (5)  $P_r = S A_e$ .

aonde a área  $A_e$  é a abertura efetiva da antena receptora, não a área real.

Não apenas nessa função de direção, mas também na função da impedância de carga o receptor fornece para a antena;

por exemplo,  $P_r$  teria que ser zero se a carga fosse um curto circuito ou um circuito aberto.

Os fatores na eq. 1 através da eq. 5 podem ser combinados e obtém-se:

$$\begin{aligned}
 (6) \\
 P_r &= (P/G_t) \left( \frac{1}{4\pi R_r^2} \right) A_{e,r} (1 - f_{sp}) G_r \left( \frac{1}{4\pi R_r^2} \right) A_r \\
 &= \left( \frac{P_r G_r A_r}{(4\pi)^2 R_r^2 R_r^2} \right) [A_{e,r} (1 - f_{sp}) G_{t,r}]
 \end{aligned}$$

Os fatores associados com o espalhador são combinados dentro dos parênteses, termos elevados ao quadrado.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Esses fatores são difíceis de serem medidos individualmente, e sua contribuição relativa não são interessantes para quem deseja saber o tamanho do sinal recebido pelo radar. Então, eles são normalmente combinados em um fator apenas, a seção transversal do espalhamento do radar:  
(7)

$$\sigma = A_e (1 - f_d) G_{ts}$$

A seção transversal do radar é a medida da natureza e do tamanho do alvo. Isso caracteriza o alvo de uma maneira que é especialmente usada para calcular a energia do eco esperada do alvo.

A seção transversal  $s$  é a função das direções da onda incidente e da onda em direção ao receptor, assim como a forma do espalhador e propriedades dielétricas.

A forma final da equação do radar é obtida reescrevendo a eq. 6 usando a definição da eq. 7:

(8)

$$P_r = \frac{P_t G A_e}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2} \sigma$$



PRINCÍPIOS DE RADAR

A situação mais comum é aquela para qual locais de transmissão e recepção são os mesmos, então as distâncias do transmissor e receptor são as mesmas.

Quase tão comum é o uso da mesma antena para transmitir e receber, então os ganhos e as aberturas efetivas são os mesmos, isto é:

$$\begin{aligned}R_t &= R_r = R \\G_t &= G_r = G \\A_t &= A_r = A\end{aligned}$$

Como a área efetiva da antena está relacionada com seu ganho:  
(9)

$$A = \frac{\lambda^2 G}{4\pi}$$



PRINCÍPIOS DE RADAR

reescrevendo a equação do radar, tem-se  
(10)

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} = \frac{P_t A^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 R^4}$$

aonde duas formas são dadas, uma em termos do ganho da antena e a outra em termos da área da antena.

As equações do radar (eq. 8 and eq. 10) são equações gerais para ambos alvos, pontuais e de área.

Isto é, a seção transversal de espalhamento  $\sigma$  não é definida em termos de nenhuma característica de um tipo de alvo, porém da sua seção transversal de espalhamento.

A forma da equação 10 é para o radar monoestático, e a eq. 8 para o radar biestático, contudo também pode ser usada para um radar monoestático quando as condições para  $R$ ,  $G$ ,  $A$  dadas acima forem satisfeitas.



PRINCÍPIOS DE RADAR

$$P_r = \frac{P_t G^2 \theta^2 H \pi^3 K^2 L}{1024 (\ln 2) \lambda^2} \times \frac{Z}{R^2}$$

Abaixo está a lista das variáveis, o que elas são, e como são medidas.

**Pr:** Energia média de retorno de um alvo para o radar. O radar envia mais de 25 pulsos e então mede a energia média que é recebida nos retornos. O radar usa pulsos múltiplos já que o pulso de retorno varia para alvos meteorológicos. Este é um valor desconhecido do radar, porém é diretamente calculado.

**Pt:** Energia de pico transmitida pelo radar. Este é um valor conhecido pelo radar. É importante conhecê-lo, pois a energia média de retorno é diretamente relacionada a energia transmitida.

**G:** Ganho da antena do radar. Este é um valor conhecido pelo radar. Esta é uma medida da habilidade da antena de focar. This is a measure of the antenna's ability to focus a energia que parte para dentro do feixe. A energia recebida d e um dado alvo é diretamente relacionada ao quadrado do ganho da antena.

**$\theta$ :** Largura do feixe angular do radar. Este é um valor conhecido pelo radar. Através da equação de Probert-Jones pode ser aprendido que a energia de retorno está diretamente relacionada com o quadrado da largura do feixe angular. O problema se dá, quando assume-se a equação, é que a precipitação enche o feixe dos radares com feixes mais largos que dois graus. Uma suposição inválida para qualquer radar meteorológico de longa distância. A resolução baixa para grandes distâncias é chamado de problema de razão de aspecto.



PRINCÍPIOS DE RADAR

**H:** Comprimento do pulso do radar. Este é um valor conhecido do radar. A energia recebida de um alvo meteorológico está diretamente relacionada com o comprimento do pulso.

**K:** Este é uma constante física. Este é um valor conhecido do radar. Esta constante se baseia na constante dielétrica da água. Esta é uma suposição que tem que ser feita, mas também pode causar alguns problemas. A constante dielétrica da água é aproximadamente um, o que significa que possui uma boa refletividade. O problema ocorre quando alvos meteorológicos não compartilham dessa mesma refletividade. Alguns exemplos disso são a neve e dry granizo, já que suas constantes estão em torno de 0.2.

**L:** Este é o fator de perda do radar. Este é um valor calculado para compensar a atenuação pela precipitação, gases atmosféricos e limitações da detecção do receptor. A atenuação por precipitação é uma função da intensidade da precipitação e o comprimento de onda. Para gases atmosféricos, é uma função do ângulo de elevação, alcance, e comprimento de onda. Como a perda é de 2dB, todos sinais estão acima de 2dB.

**$\lambda$ :** Este é o comprimento de onda da energia transmitida. Este é um valor conhecido do radar. A quantidade de energia retornada de uma precipitação é inversamente já que comprimento de onda curto estão sujeitos à atenuação significativa. Quanto maior o comprimento de onda, menor será a atenuação causada pela precipitação.





PRINCÍPIOS DE RADAR

**Z:** Este é o fator de refletividade do precipitante. Este é um valor que é resolvido matematicamente pelo radar. O número de gotas e seu tamanho afetam esse valor. Este valor pode causar problemas, pois o radar não consegue determinar o tamanho do precipitante. O tamanho é importante já que o fator de refletividade do alvo precipitante é determinado elevando o diâmetro de cada gota num volume de amostra à sexta potência e então somando todos esses valores juntos.  $\frac{1}{4}$ " de gota reflete a mesma quantidade de energia que  $64 \frac{1}{8}$ " de gota, mesmo tendo 729 vezes mais líquido.

**R:** Este é o alcance do alvo precipitante. Este valor pode ser calculado medindo o tempo que o sinal leva para retornar. O alcance é importante já que a potência média de retorno de um alvo é inversamente relacionada com o quadrado do alcance do radar. O radar tem que normalizar a potência de retorno para compensar a atenuação do alcance.



PRINCÍPIOS DE RADAR

# Mínimo Sinal Detectável



PRINCÍPIOS DE RADAR

## IMPLICAÇÕES DE RUÍDO NO RECEPTOR DO RADAR

O receptor do radar é limitado em sua habilidade de detectar um sinal de eco pela energia de ruído a qual ocupa a mesma porção do espectro de frequência como o sinal.

O sinal de ruído mais fraco que um radar pode detectar é referido como o sinal mínimo detectável (SMD). O SMD pode ser de difícil especificação, pois é uma quantidade estatística e o critério para declarar a detecção pode variar em diversas circunstâncias.

Detecção é usualmente baseada na estabilização de um ponto inicial no receptor do radar. Se o ponto inicial é muito alto, então sinais fracos ou ecos podem ser perdidos.

Por outro lado, se o ponto inicial é configurado muito baixo, então ruídos detectados pelo radar serão como alvos e alarmes falsos serão dados. O ruído presente no receptor do radar limita sua sensibilidade.

O receptor é sensível ao alcance das frequências transmitidas e fornece uma amplificação do sinal de retorno.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Com o objetivo de fornecer o maior alcance, o receptor deve ser muito sensível sem introduzir ruído excessivo. A habilidade de detectar um sinal recebido de um ruído de plano de fundo depende da razão sinal-ruído (S/N).

O ruído de plano de fundo é especificado por um valor médio, chamado de potência equivalente de ruído (PER). Isto diretamente iguala o ruído a um nível detectável de potência para que possa ser comparado com o retorno. Usando essas definições, o critério para uma detecção bem sucedida é:

$$P_r > (S/N) \text{ PER},$$

onde  $P_r$  é a potência do sinal de retorno. Como isso é uma quantidade significativa na determinação do desempenho do radar, é dada uma designação única,  $S_{\text{min}}$ , e é chamada de *Sinal Mínimo para Detecção*.

$$S_{\text{min}} = (S/N) \text{ PER}$$

Como  $S_{\text{min}}$ , expresso em Watts, é usualmente um número pequeno, tem sido provado sua utilização para definir o equivalente em decibel, *Mínimo Sinal Detectável* (MSD)

$$\text{MSD} = 10 \text{ Log } (S_{\text{min}}/1 \text{ mW})$$



PRINCÍPIOS DE RADAR

## MSD e ALCANCE

Então há um nível inicial inferior com habilidade de detecção de ecos.

Para a maioria dos radares, o MSD é em torno de 15 dBZ para um sinal a 100 km para a signal at 100 km. Isto significa que uma tempestade mais fraca que 15 dBZ a 100 km, não será detectada pelo radar.

Se uma tempestade está mais perto que 100km do radar com intensidade abaixo de 15 dBZ, talvez seja detectada.

Se a tempestade está mais longe que 100km, o ponto inicial aumenta para mais de 15 dBZ. A razão para isso, é a expansão do feixe do radar com o alcance, que reduz a potência incidente em hidrometeoros, enquanto que distâncias extendidas de volta para o radar enfraquecem o sinal ainda mais.

Um termo de correção de alcance é feito na equação do radar, mas o menor nível inicial do receptor finalmente determina se a tempestade será observada ou não.

A implicação para o usuário é reconhecer que de fato as tempestades fracas não são geralmente detectadas a longos alcances. Isto tem um impacto na observação da chuva em geral a um longo alcance do radar. Geralmente existe chuva fraca em longos alcances, mas não é detectado pelo radar.



PRINCÍPIOS DE RADAR

# A CONVERSÃO Z-R

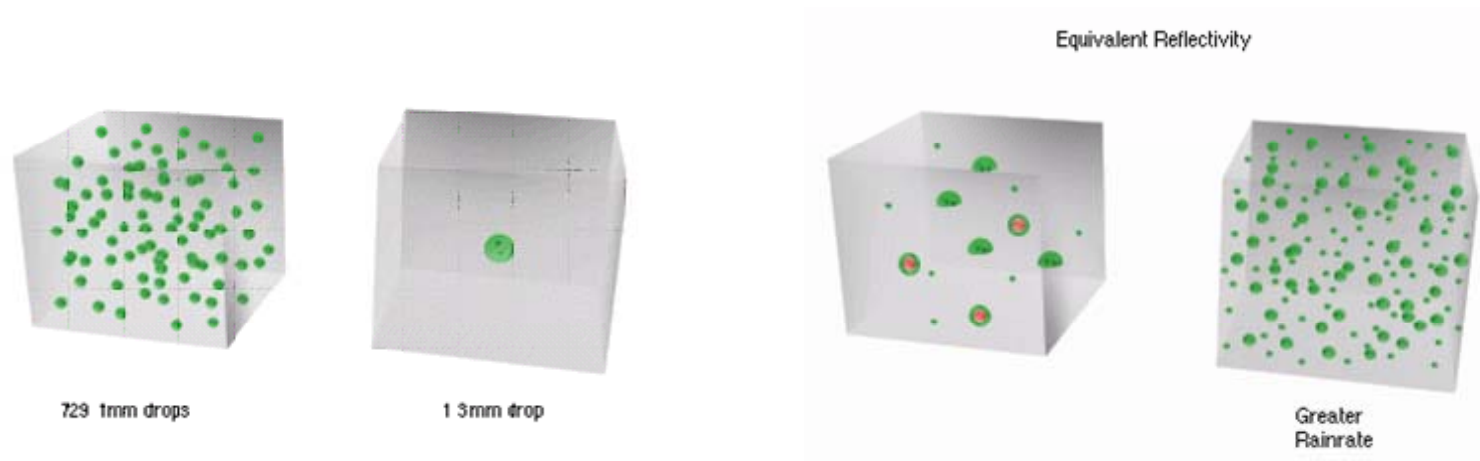


PRINCÍPIOS DE RADAR

## DERIVANDO CHUVA DA REFLETIVIDADE

Taxas de chuva ( $R$ ) são diretamente relacionadas com a distribuição do tamanho da gota da precipitação, baseado no cúbico do diâmetro.

Refletividade ( $Z$ ) está diretamente relacionada com a distribuição do tamanho da gota da precipitação, baseado na sexta potência do diâmetro.



Se a distribuição do tamanho da gota fosse conhecida, a relação entre  $Z$  e  $R$  poderia ser calculada. Isso não é conhecido, portanto não há como definir uma única relação entre  $Z$  e  $R$ . Ao invés, relações empíricas foram desenvolvidas.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DA GOTA

A frequência de distribuição do tamanho de gotas (diâmetros, volumes) que é característico de uma dada nuvem ou de uma dada chuva.

Nuvens mais naturais tem distribuições unimodal (máximo simples), mas ocasionalmente distribuições bimodal são observadas.

Em nuvens convectivas, a distribuição do tamanho da gota pode variar com o tempo e sistematicamente com a altura, o tamanho modal aumenta e o número diminui com a altura.

Para muitos propósitos a utilização de um simples parâmetro representando a distribuição dada é o diâmetro mediano de volume, que é, o diâmetro para qual o volume total de gotas com diâmetros maiores é igual ao volume total de gotas com diâmetros menores.

A distribuição do tamanho de gotas é um dos fatores primários envolvidos na determinação da refletividade do radar de qualquer precipitação, ou massa de nuvem.





PRINCÍPIOS DE RADAR

## ESPECTRO DE GOTA

Para um espectro de gota representado por uma função gamma normalizada

$$N(D) = N_w f(\mu) \left( \frac{D}{D_0} \right)^\mu \exp \left( - \frac{(3.67 + \mu)D}{D_0} \right)$$

$$f(\mu) = \frac{6}{(3.67)^4} \frac{(3.67 + \mu)^{\mu+4}}{\Gamma(\mu+4)}$$

$D_0$  = Tamanho equivolumétrico  
mediano da gota

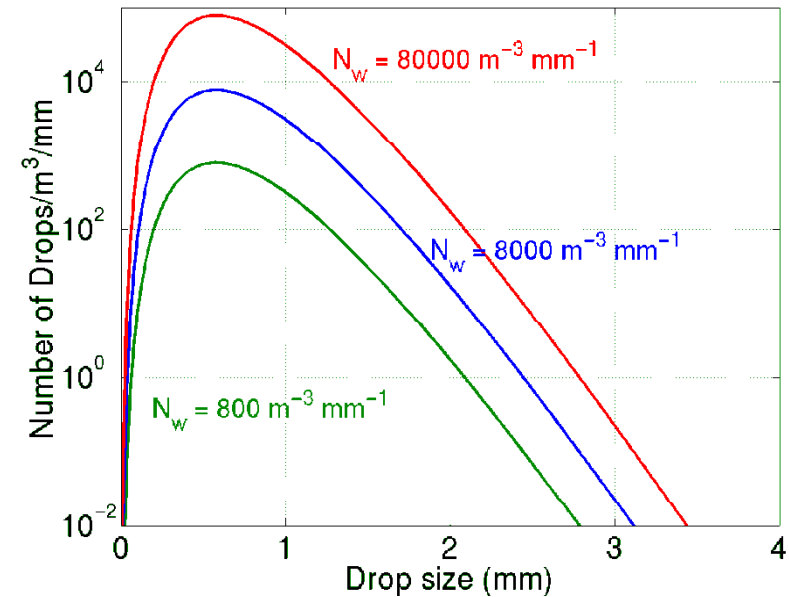
$N_w$  = Concentração normalizada

$m_i$  = largura do espectro

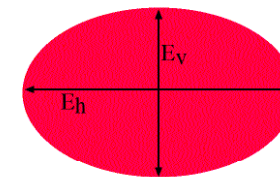
Para cada  $Z_{dr}$  calcula-se  $Z$  for  $R=1\text{mm/h}$   
 $\text{dBZ}(1\text{mm/hr}) = f(Z_{dr})$

Aumento  $N_w$ , ambos  $R$  e  $Z$  escalam com  
 $N_w$ ,

$$\text{dBR} = \text{dBZ}(\text{obs}) - f(Z_{dr})$$



bigger drops become  
more oblate



so  $\sigma_h > \sigma_v$

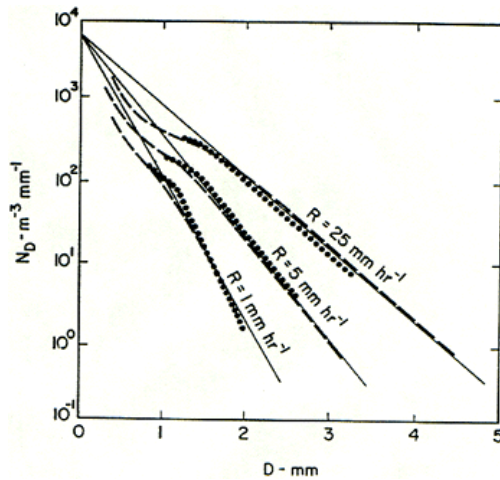


PRINCÍPIOS DE RADAR

Assim, a taxa de chuva (em profundidade por tempo) é dada por

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} u(D) D^3 n(D) dD$$

Para a distribuição Marshall-Palmer a equação é



$$n(D) = N_0 \exp(-\Lambda D)$$

$$R = \frac{\pi}{6} N_0 \int_0^{\infty} u(D) D^3 \exp(-\Lambda D) dD$$



PRINCÍPIOS DE RADAR

O tamanho da gota tem um importante efeito na atenuação e refletividade do tempo. E dependendo da taxa de precipitação, pode haver algum grau de confiança que determinados volumes de tamanho de gota será encontrado na nuvem.

Quando isto é conhecido, a refletividade desses tipos de gotas podem ser estimados e comparativamente pela refletividade a taxa de precipitação pode ser estimada. A tabela seguinte ajuda a ilustrar.

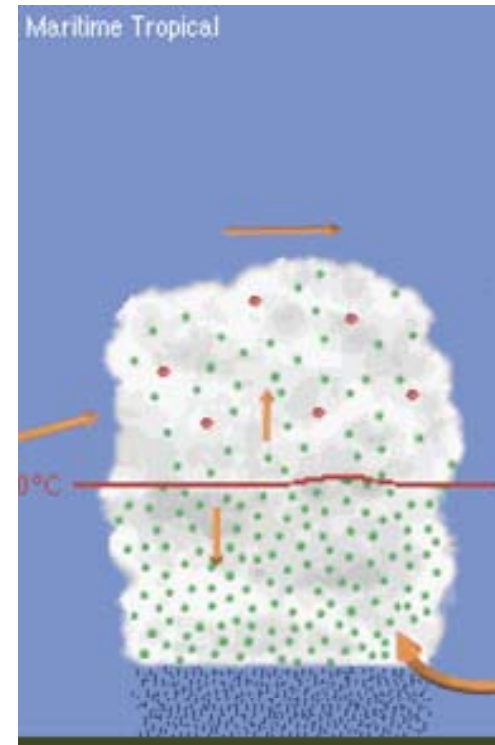
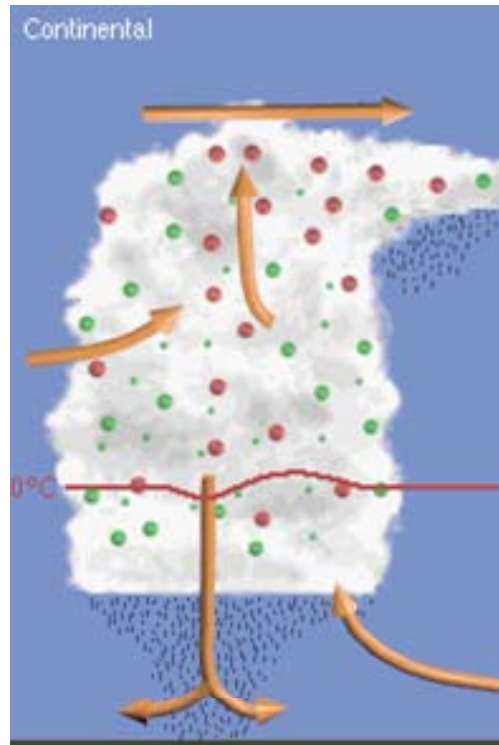
A porcentagem esperada para gotas de tamanhos específicos por taxa de precipitação está mostrada abaixo.

Diâmetro da gota (D - cm)	Taxa de precipitação (mm/hr)			
	0.25	1.25	2.5	12.5
	Porcentagem de um volume dado com gotas de diâmetro D			
0.05	28.0	10.9	7.3	2.6
0.10	50.1	37.1	27.8	11.5
0.15	18.2	31.3	32.8	24.5
0.20	3.0	13.5	19.0	25.4
0.25	0.7	4.9	7.9	17.3
0.30	-	1.5	3.3	10.1
0.35	-	0.6	1.1	4.3



PRINCÍPIOS DE RADAR

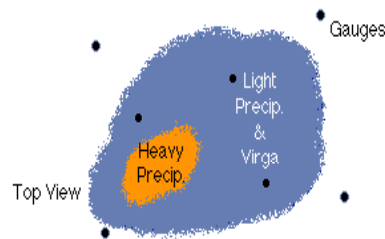
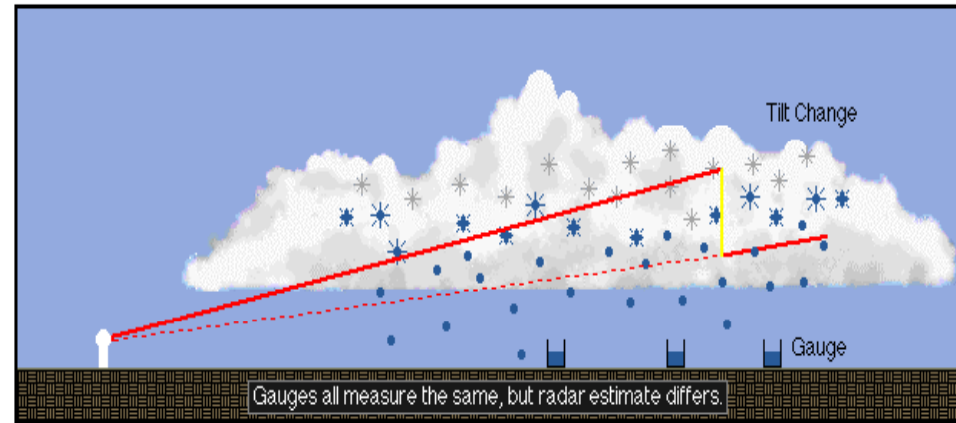
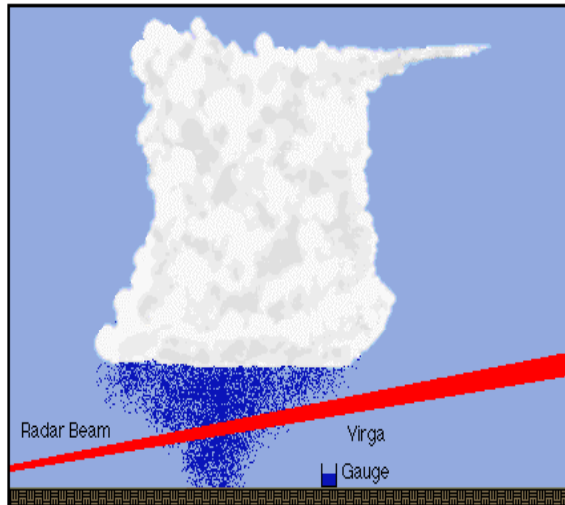
## ESPECTRO DE GOTA TÍPICO DE UMA NUVEM





PRINCÍPIOS DE RADAR

# RADAR x RAINGAUGE





PRINCÍPIOS DE RADAR

## REFLETIVIDADE DO RADAR

Em geral, a medida de eficiência do radar é a interceptação do alvo e o retorno da energia ao radar.

Depende do tamanho, do formato, aspecto, e propriedades dielétricas do alvo. Inclui não somente os efeitos da reflexão, mas do espalhamento e da difração.

Em particular, a refletividade de um alvo meteorológico depende dos seguintes fatores:

- o número de hidrometeoros por unidade de volume;
- os tamanhos dos hidrometeoros;
- o estado físico dos hidrometeoros (gelo ou água);
- o formato ou formatos dos elementos individuais do grupo; e
- se assimétrico, seu aspecto em relação ao radar. A refletividade do radar tem dimensões de área por unidade de volume (e.x.,  $\text{cm}^2\text{m}^3$ , ou, mais comumente,  $\text{cm}^1$  or  $\text{m}^1$ ) e é definido por

$$\eta = \sum_i N_i \sigma_i,$$

onde  $N_i$  é o número de hidrometeoros por unidade de volume com secção transversal de retroespalhamento  $\sigma_i$ , e a soma de todos os hidrometeoros em uma unidade de volume.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Para hidrometeoros esféricos pequenos o suficiente comparados com o comprimento de onda, para a aproximação de espalhamento Rayleigh ser válida, a secção transversal do radar é relacionado com o tamanho da partícula por

$$\sigma = \frac{\pi^5 |K|^2 D^6}{\lambda^4}, \quad K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2},$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $D$  o diâmetro do hidrometeoro, e  $K$  o fator dielétrico definido por

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \sum_{i=1}^n D_i^6 \quad Z = \sum_{i=1}^n D_i^6$$

onde  $m$  é o índice complexo de refração do hidrometeoro.

Para bandas do radar L a X água tem  $|K|^2 = 0.93$  e para o gelo  $|K|^2 = 0.2$



PRINCÍPIOS DE RADAR

A intensidade do sinal de retorno (**eco do radar**) recebido pelo radar depende não somente da intensidade da chuva, mas também na distância da chuva para o radar, e na sensibilidade na antena e nas partes eletrônicas do radar. O sinal recebido por uma chuva mais distante é mais fraco comparado a uma chuva mais perto do radar.

O programa do radar computa automaticamente uma correção do alcance e calibração da refletividade do equipamento, ao qual é dado o símbolo **Z**. Mas **Z** pode variar de valores extremamente grandes para chuva pesada a valores pequenos para uma mistura. Para ser possível visualizar essa variação de **Z** na tela do computador, o programa primeiramente faz o logarítmo de **Z**, o qual é expressado em unidades de decibéis (**dB**). Então, os números que geralmente são mostrados nas imagens de refletividade do radar são expressos em **dBZ**.

Valores altos de dBZ correspondem à chuva forte de tempestades intensas, enquanto que valores mais baixos correspondem à chuva fraca de nuvens rasas, ou retorno de insetos. A taxa de precipitação (TP) é definida como a razão do aumento da profundidade da água em um reengage, medido em mm/hour.

Uma relação aproximada entre **dBZ**, **TP**, e descritiva intensidade é dada na seguinte figura.

Por exemplo, uma refletividade de 40 dBZ corresponde a uma taxa de precipitação de TP = 10 mm/h, chuva moderada.





PRINCÍPIOS DE RADAR

Precipitação é geralmente medida usando a relação entre o

**FATOR DE REFLETIVIDADE (Z em  $\text{mm}^6 / \text{m}^{-3}$ )**

e a

**INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO (R in  $\text{mm} / \text{hr-1}$ )**

Tabelas de refletividade são usadas nas estações e usadas como base para uma interpretação inicial e cálculos.

A intensidade de precipitação R pode ser empiricamente relacionada com o fator de refletividade Z pela expressão:

$$\mathbf{Z = AR^b}$$

onde A e b são constantes e R é a intensidade de precipitação em mm/hr.

O fator de refletividade Z é dependente do número e tamanho das gotas de chuva por unidade de volume e tem unidade de  $\text{mm}^6/\text{m}^{-3}$ .

Vários pesquisadores têm criado uma grande variedade para os valores de A e b

O valor de A e b será específico para cada radar e sua configuração.

Um número de ambiguidades é conhecido e possível, dependendo da configuração do radar e da situação meteorológica em particular.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## Relações ZR

Expressões típicas para tipos de precipitação

chuva estratiforme  $Z = 200R^{1.6}$

chuva orográfica  $Z = 31R^{1.71}$

tempestades  $Z = 286R^{1.37}$

neve  $Z = 2000R^2$

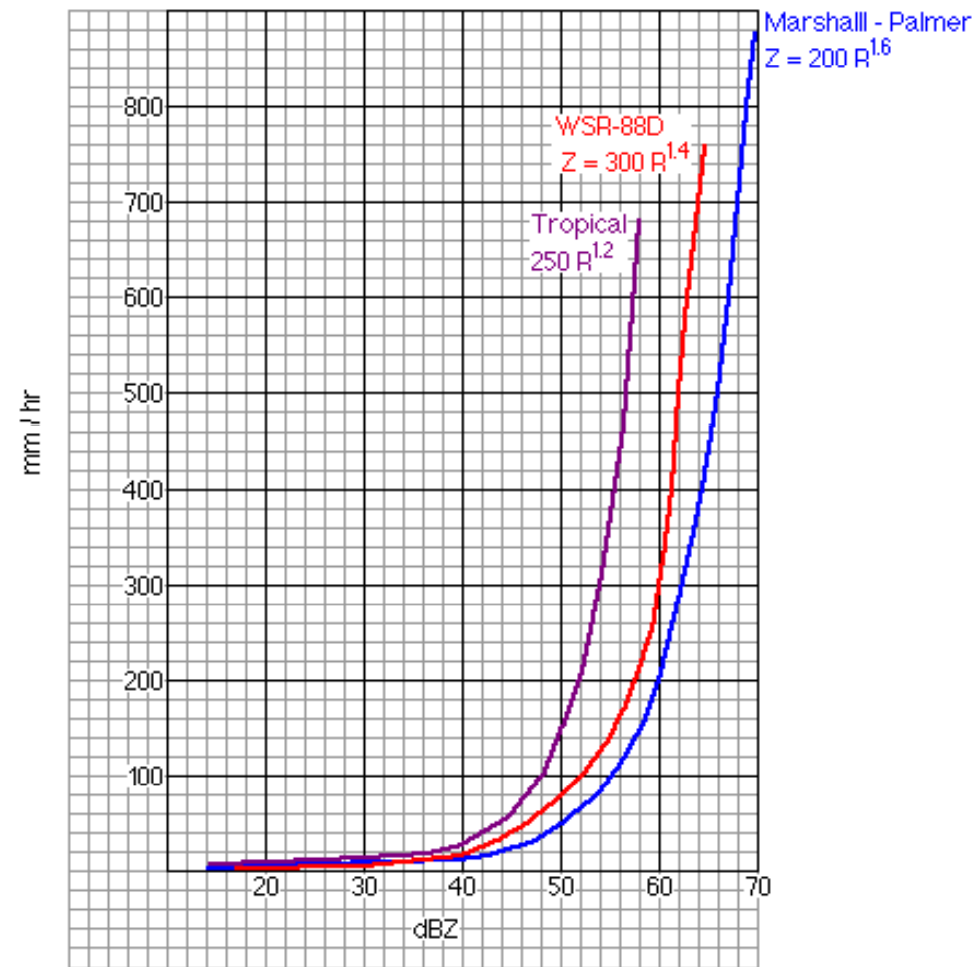
Na falta de informação é geralmente aceito, em climas de latitudes médias, o uso do valor padrão de  $Z = 200R^{1.6}$ .

Usualmente  $Z$  é especificado em uma escala logarítmica onde  $Z_{dB} = 10 \log Z$ .



PRINCÍPIOS DE RADAR

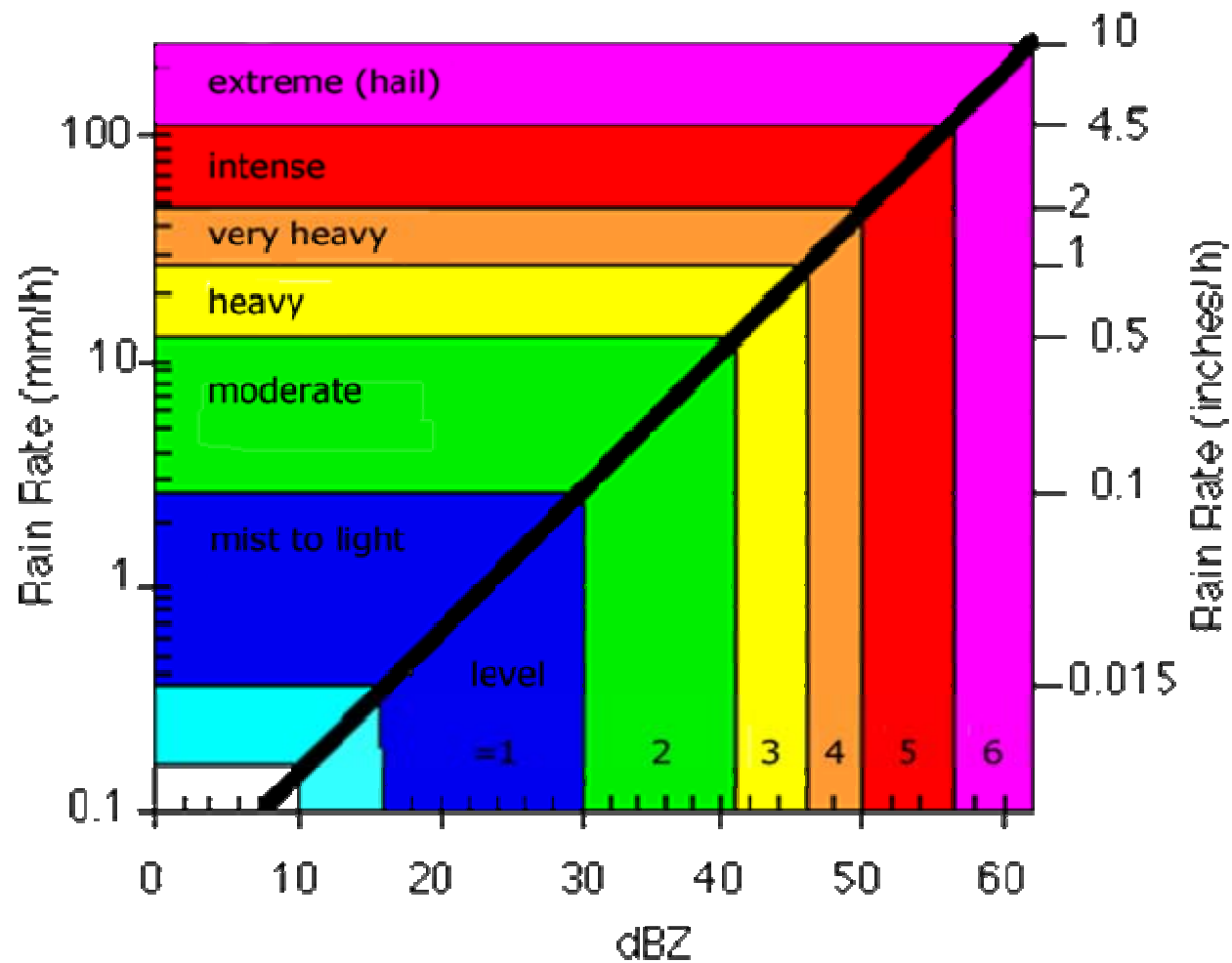
## Relações ZR





PRINCÍPIOS DE RADAR

## CATEGORIA DE PRECIPITAÇÃO





PRINCÍPIOS DE RADAR

# ATENUAÇÃO



PRINCÍPIOS DE RADAR

# ATENUAÇÃO

Atenuação é o enfraquecimento do feixe do radar quando movendo-se para baixo devido à perda de energia por espalhamento e absorção.

Quanto mais para baixo mover-se o feixe do radar mais poeira, hidrometeoros, etc o feixe do radar terá que atravessar. Devido à atenuação, tempestades próximas ao radar são mais bem amostradas que tempestades longe do radar.

Espalhamento e atenuação do feixe ambas combinadas produzem uma amostragem muito pobre de tempestades longe do radar.

A atenuação é maior quando o feixe do radar atravessa um grande número de hidrometeoros.

Tempestades e precipitação próximas ao radar degradam a sua energia antes de chegar a lugares mais distantes.

Comprimento de onda mais curto do feixe do radar atenuam mais rapidamente do que comprimentos maiores.

Por causa disso a banda C tem um alcance mais curto de alta claridade comparado com a banda S.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Integrando o lado esquerdo tem-se:

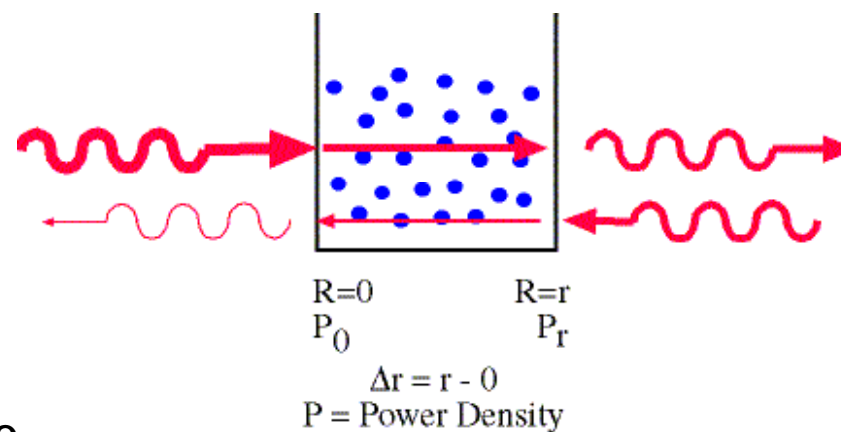
$$P_r = P_0 e^{-2 \int_0^r k dr}$$

onde o termo exponencial é o **fator de atenuação** o qual será definido como:

$$\kappa = e^{-2 \int_0^r k dr}$$

Substituindo na equação do radar, tem-se:

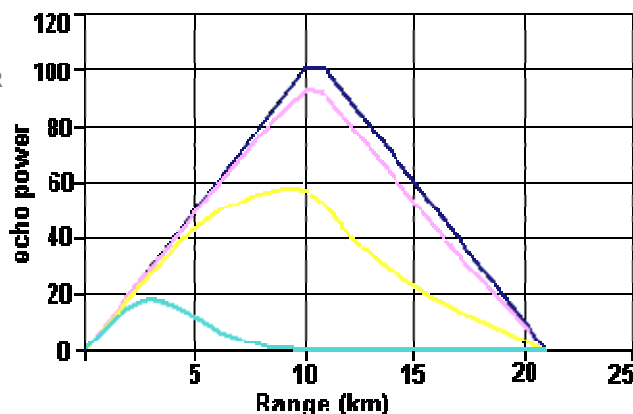
$$P_r = \frac{\pi^3 P_t G^2 \theta^2 h |k_w|^2 \kappa Z_e}{1024 \ln(2) \lambda^2 r^2}$$





PRINCÍPIOS DE RADAR

## ATENUAÇÃO DA CHUVA



Este gráfico mostra o efeito da atenuação da chuva para diferentes comprimentos de onda.

A curva no topo, azul, mostra o tempo não atenuado, para uma tempestade cilíndrica com 20km de diâmetro a intensidade da chuva de 100 mm/hr no centro.

A curva rosa mostra o retorno visto por um radar de banda S.

As duas próximas curvas (amarela e azul claro) mostram a saída de um radar de banda C e banda S respectivamente. Todos os resultados foram normalizados.

É óbvio que a banda X sofre atenuação e não consegue enxergar tempestades distantes, enquanto a banda S possui pouca atenuação.

Banda C oferece uma bom negócio. Por essas razões, radares de banda X são usados somente para curtas distâncias, de banda S são usados nos trópicos, pois podem ver além de tempestades severas, e de banda C é favorecido em latitudes temperadas, possuindo boa sensibilidade e alcance.