

Formulário de referência

Relações para resolver as perguntas conhecidas das categorias 3, 2 e 1, reunidas por tema. Uma fórmula por linha; os símbolos comuns são definidos uma vez e as diferenças de contexto junto do tema.

Conferido com as 1 086 perguntas conhecidas. Os cálculos usam modelos ideais e as condições indicadas em cada tema.

Legenda comum

V (ou U): tensão (volt, V); I : corrente (ampere, A); R : resistência (ohm, Ω); P : potência (watt, W).

f : frequência (hertz, Hz); T : período (segundo, s); t : tempo (s, salvo indicação h); C : capacidade (farad, F); L : auto-indução (henry, H).

$\pi \approx 3,1416$; $\sqrt{}$: raiz quadrada; $|x|$: módulo; $\sum$: soma dos termos. Índices numéricos identificam elementos ou medições; símbolos redefinidos num tema valem nesse contexto.

Converter prefixos antes de calcular. Usar unidades SI excepto nas fórmulas que indicam MHz, km, Ah, h, dBW ou dBm. Grandezas em razões devem usar unidades iguais.

01 Unidades, prefixos e código de cores

x : valor numérico; a, b : expoentes dos prefixos de origem e destino. d_1, d_2, d_3 : algarismos das bandas; m : expoente do multiplicador; δ : tolerância em percentagem. Cores dos algarismos: preto 0, castanho 1, vermelho 2, laranja 3, amarelo 4, verde 5, azul 6, violeta 7, cinzento 8, branco 9. Multiplicadores dourado e prateado: expoentes -1 e -2 ; tolerâncias habituais: castanho $\pm 1\%$, vermelho $\pm 2\%$, dourado $\pm 5\%$, prateado $\pm 10\%$.

Prefixos: G = 10^9 ; M = 10^6 ; k = 10^3 ; unidade = 10^0 ; m = 10^{-3} ; μ = 10^{-6} ; n = 10^{-9} ; p = 10^{-12} . Maiúsculas e minúsculas distinguem prefixos.

Conversão entre prefixos	$x_{\text{destino}} = x_{\text{origem}} 10^{a-b}$
--------------------------	---

Watt-hora para joule	$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$
----------------------	---------------------------------

Ampere-hora para coulomb	$1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$
--------------------------	---------------------------------

Resistência de quatro bandas	$R = (10d_1 + d_2) 10^m \Omega$
------------------------------	---------------------------------

Resistência de cinco bandas	$R = (100d_1 + 10d_2 + d_3) 10^m \Omega$
-----------------------------	--

Intervalo de tolerância	$R_{\text{real}} \in \left[R \left(1 - \frac{\delta}{100} \right), R \left(1 + \frac{\delta}{100} \right) \right]$
-------------------------	---

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

02 Lei de Ohm e potência resistiva

Usar tensão e corrente contínuas ou valores eficazes numa resistência em CA.

Tensão	$V = IR$
--------	----------

Corrente	$I = \frac{V}{R}$
----------	-------------------

Resistência	$R = \frac{V}{I}$
-------------	-------------------

Potência eléctrica	$P = VI$
--------------------	----------

Potência a partir da corrente	$P = I^2 R$
-------------------------------	-------------

Potência a partir da tensão	$P = \frac{V^2}{R}$
-----------------------------	---------------------

Tensão a partir da potência	$V = \sqrt{PR}$
-----------------------------	-----------------

Corrente a partir da potência	$I = \sqrt{\frac{P}{R}}$
-------------------------------	--------------------------

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

03 Kirchhoff, fontes e energia

$\mathcal{E}$: força electromotriz (V); r : resistência interna (Ω); R_c : carga resistiva (Ω). C_{bat} : capacidade da bateria (Ah); E : energia (J ou Wh); n : número de células iguais. Índices: in = entrada; out = saída; fonte = alimentação; carga = consumidor. No divisor, R_2 liga a saída à referência.

Lei dos nós, correntes com sinal	$\sum_k I_k = 0$
----------------------------------	------------------

Lei das malhas, tensões com sinal	$\sum_k V_k = 0$
-----------------------------------	------------------

Tensões em série	$V_{\text{total}} = \sum_k V_k$
------------------	---------------------------------

Correntes em paralelo	$I_{\text{total}} = \sum_k I_k$
Resistência para queda de tensão	$R = \frac{V_{\text{fonte}} - V_{\text{carga}}}{I}$
Divisor de tensão sem carga	$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$
Corrente com resistência interna	$I = \frac{\mathcal{E}}{R_c + r}$
Tensão nos terminais, em descarga	$V_{\text{terminal}} = \mathcal{E} - Ir$
Máxima transferência em CC	$R_c = r$
Máxima transferência em CA	$Z_c = Z_{\text{fonte}}^*$
O asterisco indica conjugado complexo.	
Energia a potência constante	$E = Pt$
P em W e t em s dão J; t em h dá Wh.	
Autonomia teórica da bateria	$t_h = \frac{C_{\text{bat,Ah}}}{I_A}$
Corrente constante; a autonomia real depende da descarga e das perdas.	
Bateria de células iguais em série	$V_{\text{bat}} = nV_{\text{célula}}$

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

04 Associação de resistências, condensadores e bobinas

n : número de componentes iguais; k : índice de cada componente; eq = equivalente. Para bobinas, as relações seguintes pressupõem acoplamento magnético desprezável.

Resistências em série	$R_{\text{eq}} = \sum_k R_k$
Resistências em paralelo	$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \sum_k \frac{1}{R_k}$

Duas resistências em paralelo

$$R_{\text{eq}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Resistências iguais em paralelo

$$R_{\text{eq}} = \frac{R}{n}$$

Condensadores em paralelo

$$C_{\text{eq}} = \sum_k C_k$$

Condensadores em série

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \sum_k \frac{1}{C_k}$$

Dois condensadores em série

$$C_{\text{eq}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Condensadores iguais em série

$$C_{\text{eq}} = \frac{C}{n}$$

Bobinas em série

$$L_{\text{eq}} = \sum_k L_k$$

Bobinas em paralelo

$$\frac{1}{L_{\text{eq}}} = \sum_k \frac{1}{L_k}$$

Bobinas iguais em paralelo

$$L_{\text{eq}} = \frac{L}{n}$$

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

05 Período, frequência e comprimento de onda

v : velocidade de propagação (m/s); c : velocidade da luz no vácuo, aproximadamente $3 \times 10^8 \text{ m/s}$; λ : comprimento de onda (m); ω : frequência angular (rad/s); n : ordem inteira da harmônica.

Período

$$T = \frac{1}{f}$$

Frequência

$$f = \frac{1}{T}$$

Velocidade de propagação

$$v = f\lambda$$

Comprimento de onda

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Comprimento de onda no ar,
aproximação

$$\lambda_m \approx \frac{300}{f_{\text{MHz}}}$$

Frequência no ar, aproximação

$$f_{\text{MHz}} \approx \frac{300}{\lambda_m}$$

Frequência angular

$$\omega = 2\pi f$$

Frequência da harmónica

$$f_n = n f_1$$

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

06 Valores eficazes, fase e impulsos

$v(t)$: tensão instantânea; φ : fase; Δt : atraso entre pontos equivalentes (s); D : ciclo de trabalho; t_{on} : duração activa do impulso (s). Índices p ou m = pico; pp = pico a pico; ef ou rms = eficaz. Para a corrente sinusoidal, valem as mesmas relações substituindo V por I.

Sinusóide sem componente
contínua

$$v(t) = V_p \sin(2\pi ft + \varphi)$$

Valor pico a pico da sinusóide

$$V_{\text{pp}} = 2V_p$$

Valor eficaz da sinusóide

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

Pico a partir do valor eficaz

$$V_p = \sqrt{2} V_{\text{rms}}$$

Pico a pico a partir do valor
eficaz

$$V_{\text{pp}} = 2\sqrt{2} V_{\text{rms}}$$

Média da sinusóide num período

$$V_{\text{medio}} = 0$$

Sinusóide centrada em zero; não confundir média com valor eficaz.

Valor eficaz de uma onda
periódica

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

Onda quadrada simétrica, níveis $\pm V_p$

$$V_{\text{rms}} = V_p$$

Módulo do desfasamento temporal

$$|\varphi| = 360^\circ \frac{|\Delta t|}{T}$$

O sinal depende da convenção de avanço ou atraso; quadratura = 90° .

Ciclo de trabalho

$$D = \frac{t_{\text{on}}}{T}$$

Potência média de impulsos rectangulares

$$P_{\text{media}} = DP_{\text{on}}$$

Potência nula no intervalo inactivo.

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

07 Capacidade, indutância e campos

q : carga eléctrica (C); ϵ : permitividade do dieléctrico (F/m); μ : permeabilidade do núcleo (H/m); A : área (m²); d : distância entre placas (m); N : espiras; ℓ : comprimento magnético (m). Nesta secção, E_{campo} é campo eléctrico (V/m), H campo magnético (A/m) e B densidade de fluxo magnético (T). r : distância ao eixo de um fio rectilíneo (m); Φ : fluxo magnético (Wb); θ : ângulo entre campo e normal da espira.

Corrente média de carga

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Carga do condensador

$$q = CV$$

Condensador de placas paralelas

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

Desprezar efeitos de bordo.

Bobina longa, modelo aproximado

$$L \approx \frac{\mu N^2 A}{\ell}$$

Núcleo linear e geometria fixa; a forma toroidal usa o percurso magnético médio.

Campo uniforme entre placas

$$E_{\text{campo}} \approx \frac{V}{d}$$

Relação magnética num meio linear

$$B = \mu H$$

Energia no condensador

$$E_C = \frac{1}{2} CV^2$$

Energia na bobina	$E_L = \frac{1}{2}LI^2$
Campo de um fio rectilíneo longo	$H = \frac{I}{2\pi r}$ Longe das extremidades; raio r maior que o raio do condutor.
Fluxo uniforme através de uma espira	$\Phi = BA \cos \theta$
Tensão induzida em N espiras	$ V_{\text{ind}} = N \left \frac{d\Phi}{dt} \right $ Para a mesma variação de campo e orientação, a tensão cresce com o número de espiras e a área.

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

08 Reactância, impedância e ressonância

X_C, X_L, X : reactâncias (Ω); Z : impedância complexa (Ω); j : unidade imaginária; φ : ângulo entre tensão e corrente. Q : factor de qualidade (sem unidade); R_s : resistência série de perdas (Ω); $B_{3\text{dB}}$: largura de banda a -3 dB (Hz); τ : constante de tempo (s); f_c : frequência de corte (Hz).

Em ressonância, R, L e C ideais em paralelo têm impedância equivalente R. No condensador ideal a corrente adianta a tensão 90° ; na bobina ideal atrasa 90° . Em CC permanente, o condensador ideal fica aberto e a bobina ideal em curto-circuito.

Reactância capacitiva, módulo	$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$
Reactância indutiva	$X_L = 2\pi fL$
Impedância de RLC em série	$Z = R + j(X_L - X_C)$
Módulo da impedância série	$ Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$
Desfasamento no circuito série	$\tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$
Ressonância ideal LC	$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
Condição de ressonância	$X_L = X_C$

Impedância série em ressonância $Z(f_0) = R$

Factor de qualidade da bobina $Q = \frac{X_L}{R_s}$

Factor de qualidade do ressonador $Q \approx \frac{f_0}{B_{3dB}}$

Largura de banda do ressonador $B_{3dB} \approx \frac{f_0}{Q}$

Constante de tempo RC $\tau = RC$

Corte de filtro RC de primeira ordem $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

09 Transformadores ideais

Índices p = primário e s = secundário; N : número de espiras (sem unidade). Tensões e correntes eficazes; impedâncias Ω . As relações de corrente usam módulos.

Modelo ideal: sem perdas, fugas ou saturação. Não se aplica um factor de transformação à frequência.

Relação de tensões $\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$

Relação de correntes $\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s}$

Conservação da potência $P_p = P_s$

Transformação de impedâncias $\frac{Z_p}{Z_s} = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2$

Frequência conservada $f_s = f_p$

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

10 Transístores e amplificadores operacionais

α : ganho de corrente em base comum, adimensional; β : ganho de corrente contínua do transístor; índices C = colector, B = base e E = emissor. A_v : ganho de tensão linear; in = entrada; out = saída; R_f : resistência de realimentação; R_1 : resistência de entrada no inversor ou à referência no não inversor.

Identificar primeiro a montagem no esquema original. O sinal negativo indica inversão de fase; respeitar alimentação e limites de saída.

Ganho de corrente do bipolar $\beta = \frac{I_C}{I_B}$

Ganho de corrente em base comum $\alpha = \frac{I_C}{I_E}$

Em contínuo. Para pequenas variações no ponto de funcionamento, relacionar a variação da corrente de colector com a variação da corrente de emissor.

Corrente de colector, zona activa $I_C \approx \beta I_B$

Corrente de emissor $I_E = I_C + I_B$

Ganho de tensão linear $A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}$

AMPOP inversor ideal $A_v = -\frac{R_f}{R_1}$

Saída do inversor ideal $V_{out} = -V_{in} \frac{R_f}{R_1}$

AMPOP não inversor ideal $A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1}$

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

11 Rectificação e filtragem

V_D : queda directa de um diódo (V); n : díodos em série; f_r : frequência da ondulação (Hz); f_{rede} : frequência de entrada (Hz); ΔV : ondulação pico a pico (V).

Na meia onda resistiva sem condensador da pergunta cat2-124, a tensão inversa máxima do diódo é V_p . Com condensador de reserva pode aproximar-se de $2V_p$; depende da topologia.

Queda em díodos em série $V_{queda} \approx nV_D$

Pico da tensão sinusoidal	$V_p = \sqrt{2} V_{\text{rms}}$
---------------------------	---------------------------------

Frequência da ondulação, meia onda	$f_r = f_{\text{rede}}$
------------------------------------	-------------------------

Frequência da ondulação, onda completa	$f_r = 2f_{\text{rede}}$
--	--------------------------

Ondulação com filtro capacitivo	$\Delta V \approx \frac{I}{f_r C}$
---------------------------------	------------------------------------

Aproximação com descarga quase linear entre recargas.

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

12 Potência activa, reactiva e aparente

S : potência aparente (VA); Q_r : potência reactiva (var); FP : factor de potência; φ : desfasamento. Relações com coseno e seno para regime sinusoidal; rms = valor eficaz.

Para cargas não lineares, o factor de potência não é necessariamente igual a $\cos\phi$.

Potência aparente	$S = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}}$
-------------------	-------------------------------------

Potência activa	$P = S \cos \varphi$
-----------------	----------------------

Potência reactiva	$Q_r = S \sin \varphi$
-------------------	------------------------

Factor de potência	$FP = \frac{P}{S}$
--------------------	--------------------

Triângulo de potências	$S^2 = P^2 + Q_r^2$
------------------------	---------------------

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

13 Decibéis, ganhos e atenuações

G : ganho com sinal (dB); L : perda positiva (dB); índices 1 = entrada/referência, 2 = saída/comparação. $\log_{10}$: logaritmo de base 10. Comparar potências na mesma unidade. Relações de tensão pressupõem a mesma impedância para a equivalência com ganho de potência. ΔS : diferença de unidades S de um medidor devidamente calibrado.

Ganho de potência	$G = 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$
-------------------	---

Potência após ganho	$P_2 = P_1 10^{G/10}$
---------------------	-----------------------

Ganho de tensão	$G_V = 20 \log_{10} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$
Tensão após ganho	$V_2 = V_1 10^{G_V/20}$
Atenuação de potência positiva	$L = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$
Atenuação de tensão positiva	$L_V = 20 \log_{10} \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$
Potência após atenuação	$P_2 = P_1 10^{-L/10}$
Porcentagem de potência perdida	$p_{\text{perda}} = 100 \left(1 - 10^{-L/10} \right)$
Ganho total em cascata	$G_{\text{total}} = \sum_i G_i - \sum_j L_j$
Medidor S, convenção de 6 dB por unidade	$\Delta G \approx 6 \Delta S$ <p>Uma unidade S corresponde a cerca de 4 vezes a potência; aparelhos reais podem divergir.</p>

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

14 Níveis absolutos: dBW e dBm

P_{dBW} e P_{dBm} : níveis de potência, referidos respectivamente a 1 W e 1 mW. O argumento de um logaritmo é sempre uma razão sem unidade.

Potência em dBW	$P_{\text{dBW}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1 \text{ W}} \right)$
Potência em dBm	$P_{\text{dBm}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1 \text{ mW}} \right)$
Conversão dBW para dBm	$P_{\text{dBm}} = P_{\text{dBW}} + 30$
Watt a partir de dBW	$P_{\text{W}} = 10^{P_{\text{dBW}}/10}$

Watt a partir de dBm

$$P_W = 10^{(P_{\text{dBm}} - 30)/10}$$

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

15 Modulação AM e SSB

m : índice AM (sem unidade); V_m : amplitude do modulante; V_c : amplitude da portadora; $V_{\text{max}}, V_{\text{min}}$: extremos da envolvente; f_c : frequência da portadora; f_m : frequência modulante; P_c : potência da portadora; B : largura de banda. Frequências e banda na mesma unidade.

Na AM convencional, $m > 1$ corresponde a sobremodulação. A relação PEP/potência média da voz em SSB depende da envolvente; 2,5:1 é uma aproximação histórica do banco, não uma constante.

Índice de modulação AM

$$m = \frac{V_m}{V_c}$$

Índice AM pela envolvente

$$m = \frac{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}}{V_{\text{max}} + V_{\text{min}}}$$

AM convencional sem inversão da envolvente.

Percentagem de modulação AM

$$m_{\%} = 100m$$

Banda lateral inferior de um tom

$$f_{\text{LSB}} = f_c - f_m$$

Banda lateral superior de um tom

$$f_{\text{USB}} = f_c + f_m$$

Largura de banda AM, dupla faixa lateral

$$B_{\text{AM}} \approx 2f_{m,\text{max}}$$

Largura de banda SSB

$$B_{\text{SSB}} \approx f_{m,\text{max}} - f_{m,\text{min}}$$

Se a banda base começar perto de zero, aproxima-se de $f_{m,\text{max}}$.

Potência média AM, um tom sinusoidal

$$P_{\text{AM}} = P_c \left(1 + \frac{m^2}{2} \right)$$

PEP da AM, um tom sinusoidal

$$\text{PEP} = P_c(1 + m)^2$$

Explicação na sebenta · U.S. Navy · NEETS 12, Modulation

16 Modulação FM e PM

Δf : desvio de pico (Hz); f_c : frequência da portadora; f_m : frequência do tom modulante (Hz); β_{FM} : índice FM; D_f : razão de desvio; n : factor de multiplicação inteiro. $\Delta\varphi_{max}$: desvio de fase de pico (rad).

Carson é uma aproximação. Não confundir índice FM com percentagem do desvio permitido; esta última pode ser dada como fracção (0,2) ou percentagem (20 %).

Desvio de frequência	$\Delta f = \max f_{instantanea} - f_c $
----------------------	---

Índice FM para um tom	$\beta_{FM} = \frac{\Delta f}{f_m}$
-----------------------	-------------------------------------

Razão de desvio de fonia FM	$D_f = \frac{\Delta f_{max}}{f_{m,max}}$
-----------------------------	--

Regra de Carson	$B_{FM} \approx 2(\Delta f + f_{m,max})$
-----------------	--

Percentagem do desvio permitido	$m_{FM,\%} = 100 \frac{ \Delta f_{inst} }{\Delta f_{permitido}}$
---------------------------------	--

Multiplicação da portadora	$f_{out} = n f_{in}$
----------------------------	----------------------

Desvio após multiplicação	$\Delta f_{out} = n \Delta f_{in}$
---------------------------	------------------------------------

Índice de modulação de fase	$\beta_{PM} = \Delta\varphi_{max}$
-----------------------------	------------------------------------

Explicação na sebenta · U.S. Navy · NEETS 12, Modulation

17 PEP, rendimento e dissipação

η : rendimento (sem unidade; multiplicar por 100 para %); RF = saída de radiofrequência; DC = alimentação contínua. Para PEP, V_p e V_{pp} são amplitudes da RF no máximo da envolvente, numa carga resistiva. $P_{RF,in}$: excitação RF de entrada.

PEP pelo valor eficaz no pico da envolvente	$PEP = \frac{V_{rms,pico}^2}{R}$
---	----------------------------------

PEP pela tensão RF de pico	$PEP = \frac{V_p^2}{2R}$
----------------------------	--------------------------

PEP pela tensão RF pico a pico	$PEP = \frac{V_{pp}^2}{8R}$
Portadora contínua não modulada	$PEP = P_{media}$
Rendimento do andar de potência	$\eta = \frac{P_{RF,out}}{P_{DC}}$
Balanço de potência do amplificador	$P_{calor} = P_{DC} + P_{RF,in} - P_{RF,out}$ <p>Quando a excitação RF é desprezável, retirar esse termo.</p>
Rendimento de radiação da antena	$\eta_{ant} = \frac{P_{radiada}}{P_{entregue}}$
Rendimento pelas resistências da antena	$\eta_{ant} = \frac{R_{radiacao}}{R_{radiacao} + R_{perdas}}$

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

18 Mistura, frequência intermédia e imagem

RF = sinal recebido; LO = oscilador local; FI = frequência intermédia; imagem = outra frequência que produz a mesma FI. Todas as frequências na mesma unidade. O misturador produz soma e diferença; o filtro selecciona o produto pretendido.

Produto de soma	$f_{+} = f_1 + f_2$
Produto de diferença	$f_{-} = f_1 - f_2 $
Frequência intermédia por diferença	$f_{FI} = f_{RF} - f_{LO} $
Injecção superior do oscilador local	$f_{LO} = f_{RF} + f_{FI}$
Imagem com injecção superior	$f_{imagem} = f_{RF} + 2f_{FI}$
Injecção inferior do oscilador local	$f_{LO} = f_{RF} - f_{FI}$ <p>Válida nesta forma quando $f_{RF} > f_{FI}$.</p>
Imagem com injecção inferior	$f_{imagem} = f_{RF} - 2f_{FI} $

Explicação na sebenta · U.S. Navy · NEETS 17, RF Communications Principles

19 Osciladores, PLL, DDS e estabilidade

N : divisor de realimentação PLL; R : divisor de referência PLL (aqui não é resistência); ref = referência; PFD = comparador fase/frequência. DDS: K é a palavra de sintonia; n é o número de bits do acumulador; clk = relógio. p : erro relativo em ppm; f : leitura do frequencímetro. $A\beta_{fb}$: ganho complexo da malha de oscilação.

A expressão PLL pressupõe ausência de divisor adicional na saída. A DDS exige filtragem de reconstrução e uma saída útil abaixo de metade da frequência de relógio.

Oscilação sustentada ideal, módulo

$$|A\beta_{fb}| = 1$$

No arranque, o ganho de malha tem de exceder a unidade.

Oscilação sustentada ideal, fase

$$\arg(A\beta_{fb}) = 2\pi k$$

k é inteiro; realimentação em fase.

Frequência de comparação PLL

$$f_{\text{PFD}} = \frac{f_{\text{ref}}}{R}$$

PLL inteira, em sincronismo

$$f_{\text{out}} = \frac{N}{R} f_{\text{ref}}$$

Frequência de saída DDS

$$f_{\text{out}} = \frac{K}{2^n} f_{\text{clk}}$$

Passo de sintonia DDS

$$\delta f = \frac{f_{\text{clk}}}{2^n}$$

Erro absoluto de frequência

$$|\Delta f| = f |p| 10^{-6}$$

Explicação na sebenta · Analog Devices · DDS · Analog Devices · PLL

20 Amostragem, quantificação, bits e FFT

f_s : frequência de amostragem (amostras/s); f_{max} : maior frequência do sinal limitado em banda (Hz); T_s : intervalo de amostragem (s). n : bits do conversor; V_{FS} : amplitude total da gama de entrada (V); q : passo de quantificação (V). M : estados por símbolo; R_b : taxa de bits (bit/s); R_s : taxa de símbolos (baud); N : amostras da FFT; T_{obs} : duração observada (s).

As taxas são brutas: codificação e protocolos reduzem o débito útil. A separação entre bins não substitui a resolução real condicionada pela janela e pelo tempo de observação.

Amostragem de sinal em banda base

$$f_s > 2f_{\text{max}}$$

Igualdade é o limite ideal; reservar margem para o filtro anti-aliasing.

Intervalo entre amostras

$$T_s = \frac{1}{f_s}$$

Níveis de quantificação

$$N_{\text{niveis}} = 2^n$$

Passo ideal do quantificador

$$q = \frac{V_{\text{FS}}}{2^n}$$

Bits por símbolo, estados equiprováveis

$$b = \log_2 M$$

Taxa bruta de bits

$$R_b = R_s \log_2 M$$

Bits por símbolo pela razão das taxas

$$b = \frac{R_b}{R_s}$$

Separação entre bins da FFT

$$\Delta f_{\text{bin}} = \frac{f_s}{N}$$

Duração do bloco FFT

$$T_{\text{obs}} = \frac{N}{f_s}$$

Explicação na sebenta · Analog Devices · MT-002, amostragem · Analog Devices · MT-003, análise FFT

21 Ruído térmico e relação sinal/ruído

$k = 1,380649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$: constante de Boltzmann; Θ : temperatura absoluta (K); B : largura de banda de ruído (Hz); P_n : potência de ruído disponível (W). SNR = relação sinal/ruído; índices S = sinal, N = ruído, in = entrada, out = saída; F : factor de ruído linear; NF = figura de ruído (dB).

No ruído térmico clássico, reduzir temperatura ou banda reduz a potência de ruído; a banda tem de continuar a conter o sinal útil.

Potência de ruído térmico

$$P_n = k\Theta B$$

Relação sinal/ruído em dB

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_N} \right)$$

Factor de ruído linear

$$F = \frac{\text{SNR}_{\text{in,linear}}}{\text{SNR}_{\text{out,linear}}}$$

Figura de ruído

$$\text{NF} = 10 \log_{10} F$$

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

22 Linhas de transmissão e ondas estacionárias

Γ : coeficiente de reflexão de tensão (complexo, sem unidade); Z_L : impedância da carga; Z_0 : impedância característica real da linha; P_i, P_r : potências incidente e reflectida (W); $V_{\max}, V_{\min}$: extremos da envolvente estacionária. VF = factor de velocidade; ℓ : comprimento físico; a : atenuação por unidade de comprimento; L_{linha} : perda em dB.

Estas relações de VSWR pressupõem linha de referência sem perdas significativas. $\Gamma = 0$ dá VSWR = 1; $|\Gamma| = 1$ dá VSWR infinita. Boa adaptação não prova bom rendimento de radiação.

Coeficiente de reflexão na carga $\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$

Relação de onda estacionária de tensão $\text{VSWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$

Reflexão a partir da VSWR $|\Gamma| = \frac{\text{VSWR} - 1}{\text{VSWR} + 1}$

VSWR pela envolvente de tensão $\text{VSWR} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$

Reflexão pelas potências $|\Gamma| = \sqrt{\frac{P_r}{P_i}}$

Potência reflectida $P_r = |\Gamma|^2 P_i$

Potência líquida na carga $P_{\text{absorvida}} = P_i - P_r$

Potências referidas ao mesmo plano de medição; descontar perdas da linha se necessário.

Carga puramente resistiva $\text{VSWR} = \max\left(\frac{R_L}{Z_0}, \frac{Z_0}{R_L}\right)$

Factor de velocidade $\text{VF} = \frac{v_{\text{linha}}}{c}$

Comprimento de onda no cabo $\lambda_{\text{cabo}} = \text{VF} \frac{c}{f}$

Troço de cabo de um quarto de onda $\ell = \text{VF} \frac{c}{4f}$

Atenuação por metro

$$a = \frac{L_{\text{linha}}}{\ell}$$

Perda em dB e comprimento em m dão dB/m.

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2

23 Antenas, ganho, PAR e PIRE

G_i, G_d : ganhos lineares relativos à isotrópica e ao dipolo; $G_{\text{dBi}}, G_{\text{dBd}}$: correspondentes ganhos em dB. P_{ant} : potência entregue à antena; P_{TX} : saída do emissor. A_e : área efectiva (m²); D : directividade linear; η : rendimento de radiação; ℓ : comprimento. $G_{\text{frente}}, G_{\text{costas}}$: níveis do diagrama na mesma referência dB.

Comprimento total do dipolo ideal

$$\ell_{\text{dipolo}} = \frac{\lambda}{2}$$

Dipolo de fio, estimativa inicial

$$\ell_{\text{m}} \approx \frac{143}{f_{\text{MHz}}}$$

Ajustar à geometria e ao ambiente; o banco também arredonda usando $\lambda/2$.

Monopolo ideal de quarto de onda

$$\ell = \frac{\lambda}{4}$$

Dipolo dobrado, condutores iguais

$$Z_{\text{dobrado}} \approx 4Z_{\text{simples}}$$

Conversão entre referências de ganho

$$G_{\text{dBi}} \approx G_{\text{dBd}} + 2,15$$

Potência na antena após perda na linha

$$P_{\text{ant}} = P_{\text{TX}} 10^{-L_{\text{linha}}/10}$$

PIRE / EIRP em potência linear

$$\text{PIRE} = P_{\text{ant}} G_i$$

PAR / ERP em potência linear

$$\text{PAR} = P_{\text{ant}} G_d$$

PIRE em dBW

$$\text{PIRE}_{\text{dBW}} = P_{\text{TX,dBW}} - L_{\text{linha}} + G_{\text{dBi}}$$

PAR em dBW

$$\text{PAR}_{\text{dBW}} = P_{\text{TX,dBW}} - L_{\text{linha}} + G_{\text{dBd}}$$

Ganho e directividade lineares

$$G_i = \eta D$$

Área efectiva na direcção considerada

$$A_e = \frac{G_i \lambda^2}{4\pi}$$

Antena adaptada e polarização coincidente; para $\eta = 1$, $G_i = D$.

Relação frente/costas em dB

$$FB_{\text{dB}} = G_{\text{frente}} - G_{\text{costas}}$$

Largura de feixe a -3 dB

$$\text{HPBW} = |\theta_2 - \theta_1|$$

θ_1 e θ_2 são os pontos -3 dB em torno do lóbulo principal, lidos na figura original.

Parábola de área e eficiência constantes

$$\frac{G_2}{G_1} = \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2$$

Ganhos lineares; duplicar a frequência aumenta o ganho aproximadamente 6 dB.

Explicação na sebenta · Antenna Theory · Effective aperture · U.S. Navy · NEETS 10, Antennas and Propagation

24 Espaço livre e orçamento de ligação

d : distância entre antenas; ρ : densidade de potência (W/m^2); E_{campo} : amplitude de campo eléctrico (V/m); L_{fs} : perda em espaço livre (dB). P_{RX} : nível recebido; TX/RX = emissão/recepção; G : ganhos em dBi; L : perdas em dB. M : margem de ligação (dB). h_1, h_2 : alturas das antenas (m); R_e : raio terrestre efectivo do modelo adoptado (m).

Perda em espaço livre

$$L_{\text{fs}} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

d e λ na mesma unidade; campo distante.

Espaço livre, distância km e frequência MHz

$$L_{\text{fs}} \approx 32,45 + 20 \log_{10} d_{\text{km}} + 20 \log_{10} f_{\text{MHz}}$$

Variação da densidade de potência

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2$$

Variação da amplitude do campo

$$\frac{E_{\text{campo},2}}{E_{\text{campo},1}} = \frac{d_1}{d_2}$$

O campo decai como $1/d$; a densidade de potência como $1/d^2$.

Campo e potência, mesma distância e antena

$$\frac{E_{\text{campo},2}}{E_{\text{campo},1}} = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}}$$

Mesma direcção, ganho e meio de propagação.

Potência recebida em espaço livre

$$P_{\text{RX}} = P_{\text{TX}} G_{\text{TX}} G_{\text{RX}} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Potências e ganhos lineares; adaptação e polarização coincidentes.

Orçamento de ligação

$$P_{RX,dBm} = P_{TX,dBm} + G_{TX} + G_{RX} - L_{total}$$

L_{total} inclui percurso, cabos e outras perdas em dB.

Margem acima da sensibilidade requerida

$$M = P_{RX,dBm} - P_{sens,dBm}$$

Janela ionosférica utilizável

$$LUF < f < MUF$$

Condição de percurso, sem garantia de contacto; se $LUF > MUF$, não há janela.

Horizonte rádio, modelo de Terra esférica

$$d \approx \sqrt{2R_e h_1} + \sqrt{2R_e h_2}$$

Distância em m; h muito menor que R_e . R_e pode incluir refração atmosférica no modelo.

Explicação na sebenta · Antenna Theory · Effective aperture · U.S. Navy · NEETS 10, Antennas and Propagation

25 Blindagem, intermodulação e IP3

Índices i = incidente e t = transmitido; E : campo eléctrico (V/m); H : campo magnético (A/m). f_1, f_2 : frequências de entrada na mesma unidade; m, n : inteiros positivos; ordem = $m + n$. P_f : potência de cada fundamental; P_{IM3} : potência de um produto de terceira ordem; OIP3 = intercepção extrapolada referida à saída; níveis em dBm.

IP3 é uma extrapolação da região linear de um ensaio de dois tons iguais; não é potência segura de funcionamento. O nível de cada tom deve usar a mesma referência.

Efectividade da blindagem eléctrica

$$S_E = 20 \log_{10} \left(\frac{E_i}{E_t} \right)$$

Efectividade da blindagem magnética

$$S_H = 20 \log_{10} \left(\frac{H_i}{H_t} \right)$$

Produtos de intermodulação

$$f_{IM} = |mf_1 \pm nf_2|$$

Produto IM3 inferior, dois tons próximos

$$f_{IM3,a} = |2f_1 - f_2|$$

Produto IM3 superior, dois tons próximos

$$f_{IM3,b} = |2f_2 - f_1|$$

Intercepção de terceira ordem à saída

$$OIP3 \approx P_f + \frac{P_f - P_{IM3}}{2}$$

Explicação na sebenta · Analog Devices · RF e IP3

26 Efeito de carga e atraso de grupo

V_{fonte} : tensão sem o instrumento; R_s : resistência de saída da fonte; R_m : resistência do voltímetro; τ_g : atraso de grupo (s); φ : fase (rad); ω : frequência angular (rad/s).

Para reduzir erro de carga, usar voltímetro com resistência elevada e amperímetro com resistência reduzida.

Tensão medida com carga do voltímetro	$V_{\text{medido}} = V_{\text{fonte}} \frac{R_m}{R_s + R_m}$
---------------------------------------	--

Atraso de grupo de um filtro	$\tau_g = -\frac{d\varphi}{d\omega}$
------------------------------	--------------------------------------

Explicação na sebenta · OpenStax · University Physics, volume 2