INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Secção de Electrónica

Análise de Circuitos

Enunciados dos Problemas

Setembro de 2006

Elaborado por:
João Costa Freire

PARTE I - Circuitos Resistivos Lineares

Problema 1.1 – Noções topológicas de redes

Considere os 3 circuitos eléctricos da figura 1.1, que são compostos por geradores independentes, geradores dependentes ou comandados e por resistências.

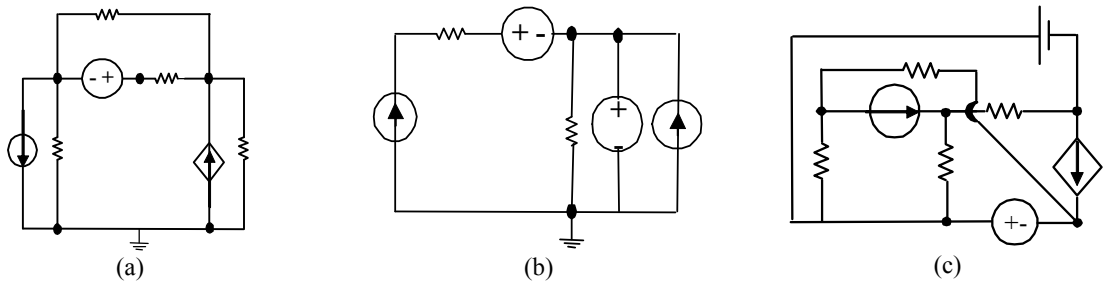


Figura 1.1 – Circuitos eléctricos resistivos

a) Ao criar o grafo (*graph*) de um circuito eléctrico e construir uma sua árvore (*tree*) e respectiva co-árvore (*cotree*), traça ramos (*branches*), galhos (*twigs*) e ligações (*links*). Diga o que entende por: grafo, árvore, co-árvore, ramo, galho e ligações.

b) Para cada um dos 3 circuitos da figura, identifique no seu grafo os nós (*nodes*) e os ramos, e calcule o seu número, N e B, respectivamente.

c) Para o circuito da figura 1.1a, trace uma árvore e verifique que o seu número de galhos T é dado por: $T = N - 1$.

d) Trace uma árvore do circuito da figura 1.1b que inclua todos os geradores de tensão e nenhum gerador de corrente. Sendo L o número de ligações obtidas, verifique a validade da relação entre L, B e N: $L = B - N + 1$.

e) Repita a alínea anterior para o circuito não planar da figura 1.1c.

Problema 1.2 - Leis de Kirchhoff

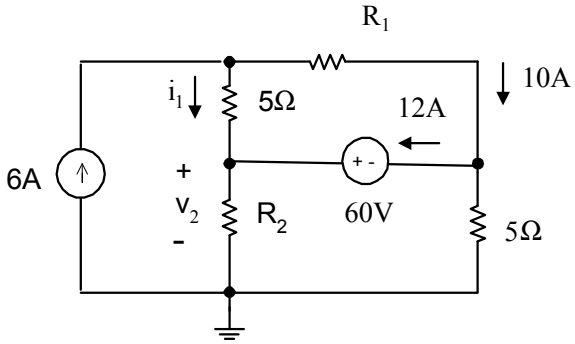


Figura 1.2 - Circuito com um gerador de tensão e um de corrente independentes

Considere o circuito da figura 1.2.

a) Construa o seu grafo e indique o número de ramos e de nós.

b) Determine os valores da corrente i_1 e da tensão v_2.

c) Calcule os valores das resistências R_1 e R_2.

Problema 1.3 - Leis de Kirchhoff

a) Quantas equações de Kirchhoff independentes consegue obter para o circuito da figura 1.3?
b) Qual a potência posta em jogo na fonte de tensão de 40V? Esta potência é fornecida ou recebida pela fonte? Comente.
c) Utilizando as leis de Kirchhoff obtenha os valores da resistência R e da condutância G, sabendo que a fonte de 5A fornece ao circuito 125W.

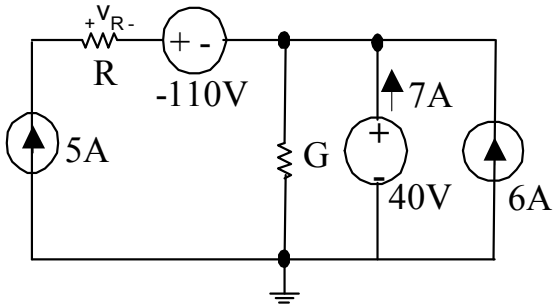


Figura 1.3 - Circuito com múltiplas fontes independentes

Problema 1.4 - Leis de Kirchhoff

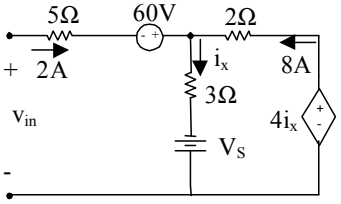


Figura 1.4 - Circuito com gerador de tensão comandado

Use a lei de Ohm e as leis de Kirchhoff para calcular as seguintes grandezas indicadas no circuito da figura 1.4:
a) Tensão de entrada v_{in} e a tensão da fonte contínua (DC) independente V_S.
b) Potência em jogo na fonte dependente $4i_x$.

Problema 1.5 – Leis de Kirchhoff (associação de resistências)

Quanto tem que valer a resistência R para ser percorrida por uma corrente de 5A com o sentido indicado na figura 1.5?

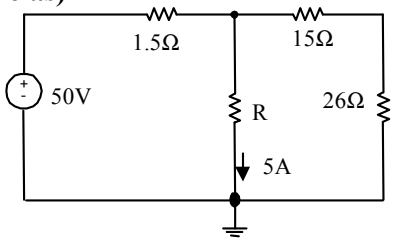


Figura 1.5 - Circuito resistivo em T excitado por uma fonte contínua de 50V e carregado com 26Ω

Problema 1.6 – Leis de Kirchhoff (associação de resistências)

O circuito da figura 1.6 tem 3 secções em escada e as resistências são dadas em Ohm.
a) Para se ter I_0=1A, qual deve ser o valor de V_S?
b) Quanto deve valer V_S para se ter I_0=0,4A?
c) Para V_S=100V, obtenha I_0.

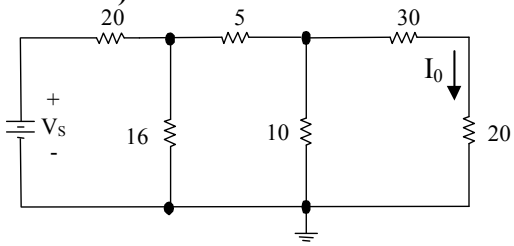


Figura 1.6 - Circuito resistivo em escada com três secções

Problema 1.7 - Método nodal

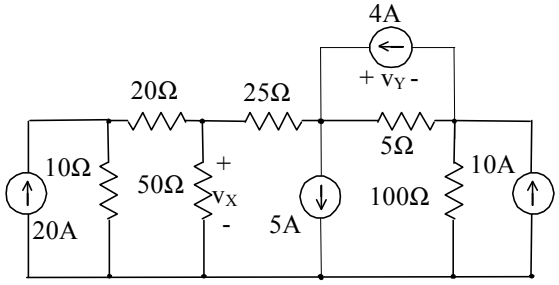


Figura 1.7 - Rede eléctrica com apenas geradores de corrente

Utilizando o método nodal, calcule as tensões v_X e v_Y da figura 1.7:

Problema 1.8 - Método nodal

a) Escreva as equações nodais do circuito da figura 1.8 na forma matricial.

b) Obtenha a partir das equações calculadas na alínea anterior a potência fornecida pela fonte de 5Volt.

c) Desenhe o grafo do circuito da figura 1.8 e trace nele o conjunto de corte (*cut-set*) que conduz à equação referente ao super nó (*super node*) considerado na alínea.

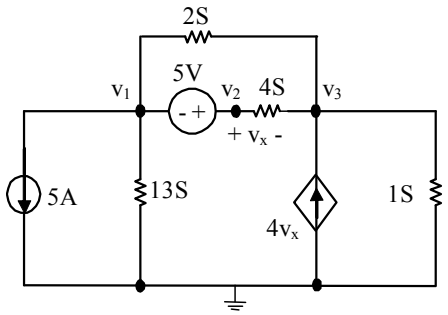


Figura 1.8 - Circuito com geradores de corrente e de tensão

Problema 1.9 - Método nodal

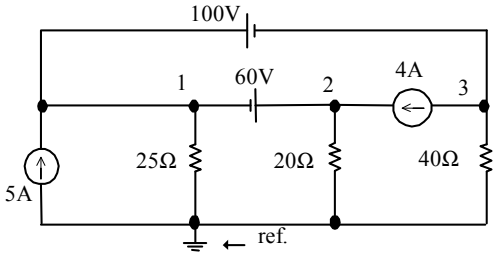


Figura 1.9 - Circuito com geradores de corrente e tensão independentes

a) Por análise nodal, calcule as seguintes grandezas do circuito da figura 1.9:
   1. A tensão no nó 3, v_3;
   2. A potência fornecida pela fonte de 5A.

b) A presença da fonte de corrente de 4A influi nas grandezas do circuito?

Problema 1.10 - Método nodal

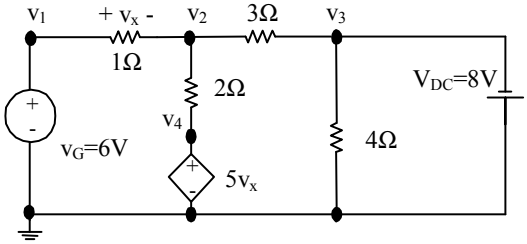


Figura 1.10 - Circuito com geradores de tensão

Pretende-se estudar o circuito da figura 1.10 usando a análise nodal.

a) Calcule as tensões nodais v_1 a v_4.

b) Calcule a potência fornecida pela fonte de 6V.

Problema 1.11 - Método nodal

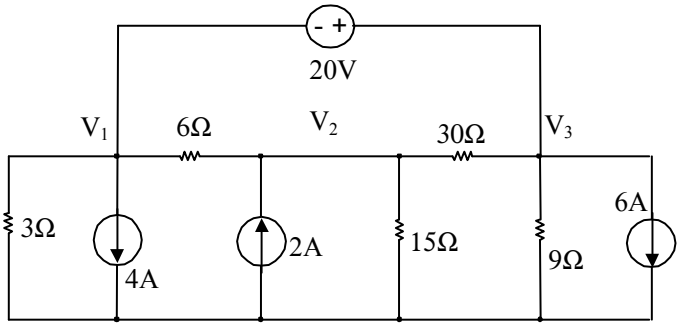


Figura 1.11 - Circuito com geradores de corrente e tensão

Considere o circuito da figura 1.11.

a) Escreva as suas equações nodais e ponha-as na forma matricial.

b) Utilizando o resultado da alínea anterior, determine a potência fornecida pela fonte de 6A.

Problema 1.12 - Teoremas de Thévenin, de Norton e da sobreposição

Considere o circuito da figura 1.12.

a) Resolva o circuito pelo método dos nós, calculando os valores de v_x e i_y.

b) Obtenha os equivalentes de Thévenin e de Norton à direita dos terminais a-b.

c) Substitua o sub-circuito à direita dos terminais a-b pelo equivalente de Norton calculado na alínea anterior. Usando o Teorema da Sobreposição, do modo que considerar mais conveniente, confirme o valor de i_y calculado na alínea a).

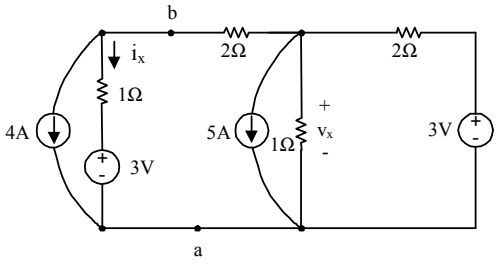


Figura 1.12 - Circuito com geradores independentes

Problema 1.13 - Método das malhas

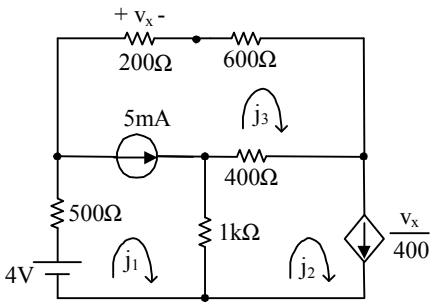


Figura 1.13 - Circuito em «T shuntado»

Considere o circuito da figura 1.13.

a) Use o método das malhas, para saber qual a potência fornecida pela bateria de 4V.

Sugestão: escreva a equação matricial do circuito e só calcule as variáveis estritamente necessárias.

b) A fonte de corrente $v_x/400$ fornece ou recebe energia eléctrica? Justifique.

Problema 1.14 - Método das malhas

No circuito da figura 1.14 use o método das malhas para obter i_o, a corrente que passa em R_L, se v_2=1,234V.
Suponha o Amplificador Operacional (AO) representado pelo seu modelo composto por uma resistência de 50kΩ entre os terminais + e - (resistência de entrada R_i), e a série dum gerador de tensão comandado $-10^4 v_1$ com uma resistência de 2kΩ (resistência de saída R_o) entre o terminal 0 e a massa do circuito. Comente sobre a utilidade deste circuito.

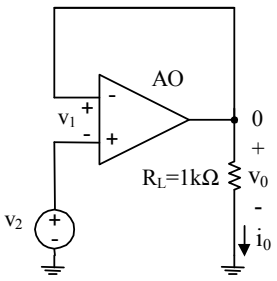


Figura 1.14 - Circuito seguidor com um Amplificador Operacional

Problema 1.15 - Teorema da sobreposição

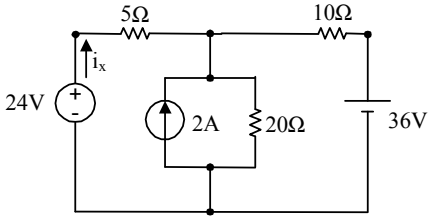


Figura 1.15 - Circuito em T com 3 geradores independentes

Para o circuito da figura 1.15, use o Teorema da Sobreposição para calcular a corrente i_x.

Calcule as potências postas em jogo nos componentes do circuito e verifique a validade do Teorema de Tellegen.

Problema 1.16 - Teoremas da Sobreposição e de Norton

a) Use o Teorema da Sobreposição para calcular, no circuito da figura 1.16, a corrente i.
b) Calcule o equivalente de Norton do sub-circuito à direita do gerador de -4V.
c) Calcule o equivalente de Norton do sub-circuito aos terminais do gerador de -4V.

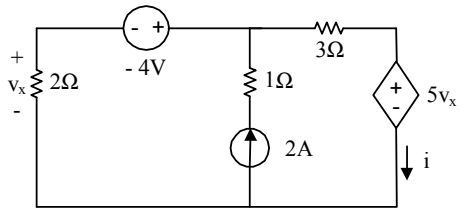


Figura 1.16- Circuito em T terminado

Problema 1.17 - Fonte real / Máxima transferência de potência / Associação de resistências

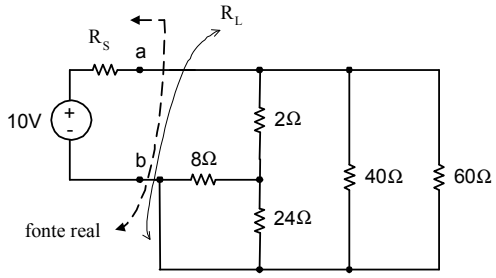


Figura 1.17 - Circuito excitado por uma fonte real

No circuito da figura 1.17, o sub-circuito à esquerda dos terminais (a, b) representa uma fonte de tensão "real" e o sub-circuito à direita a sua carga R_L.

a) Qual deve ser o valor da resistência interna da fonte «real» R_S para que se extraia a potência máxima da fonte real?
b) Qual o valor dessa potência máxima?

Problema 1.18 - Teoremas da sobreposição e de Thévenin/Norton

a) Calcule a tensão em vazio V_{OC} (*open circuit*), a corrente em curto circuito I_{SC} (*short circuit*) e a resistência equivalente de Thévenin R_{th} aos terminais a-b do circuito da figura 1.18. Use métodos distintos para cada um dos cálculos: para V_{OC} o método das malhas, para I_{SC} o teorema da sobreposição e para R_{th} a sua definição.

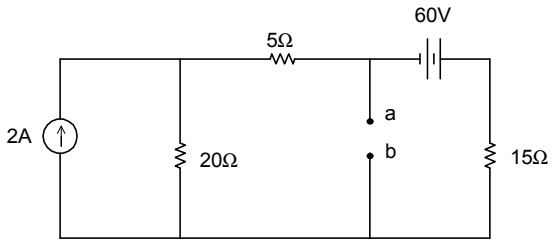
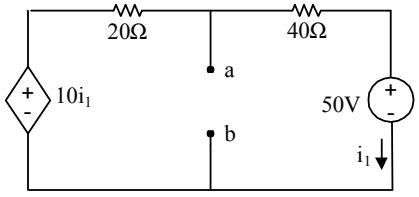


Figura 1.18 - Circuito com geradores de tensão e de corrente

b) Desenhe os circuitos equivalentes de Thévenin e de Norton, vistos dos terminais a-b.

Problema 1.19 - Teorema de Thévenin



Obtenha o circuito equivalente de Thévenin aos terminais a-b do circuito da figura 1.19.

Figura 1.19 - Circuito com dois geradores de tensão reais em paralelo (um dependente e outro independente)

Problema 1.20 - Teorema de Thévenin/Norton

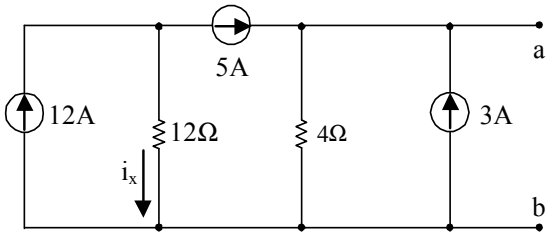


Figura 1.20 - Circuito com múltiplos geradores de corrente

a) Determine os equivalentes de Thévenin e de Norton do circuito da figura 1.20, vistos dos terminais a-b.

b) Substitua a fonte de 5A por uma fonte de tensão dependente de valor $5i_x$ (com o terminal + à direita) e repita os cálculos para obter os equivalentes de Thévenin e de Norton.

Problema 1.21 - Teorema de Thévenin

Determine o equivalente de Thévenin do circuito da figura 1.21, visto dos terminais x-y. Desenhe-o tendo em atenção o sentido do gerador de Thévenin relativamente aos nós x e y.

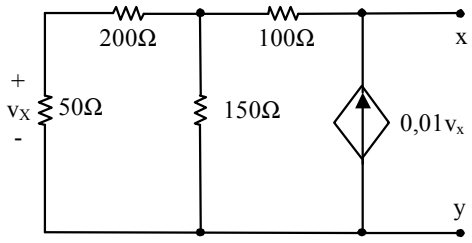


Figura 1.21 - Circuito só com um gerador de corrente comandado

Problema 1.22 - Teorema de Thévenin

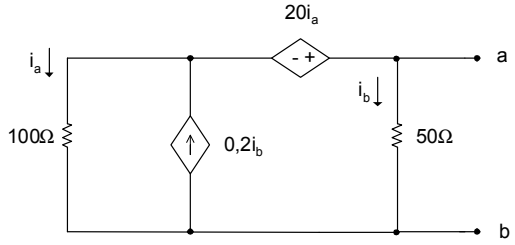


Figura 1.22 - Circuito com apenas geradores comandados

Determine o equivalente de Thévenin do circuito da figura 1.22, aos terminais a-b. Para o efeito, calcule sequencialmente as seguintes grandezas:

a) v_{oc} - tensão em vazio (circuito aberto)
b) i_{sc} - corrente em curto circuito
c) R_{th} - resistência equivalente

Problema 1.23 - Teorema de Thévenin/Norton

Considere o circuito da figura 1.23.

a) Calcule os equivalentes de Thévenin e de Norton, vistos dos terminais a-b, em função do parâmetro α.

b) Comente os valores obtidos para a resistência equivalente de Thévenin R_{th} quando $\alpha > R_1+R_2$.

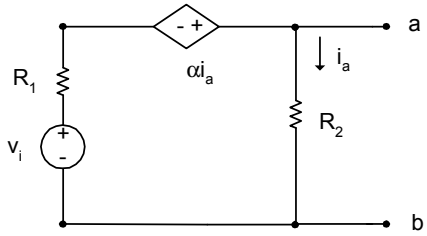


Figura 1.23 - Circuito com geradores de tensão

Problema 1.24 - Ganho e Teorema de Thévenin

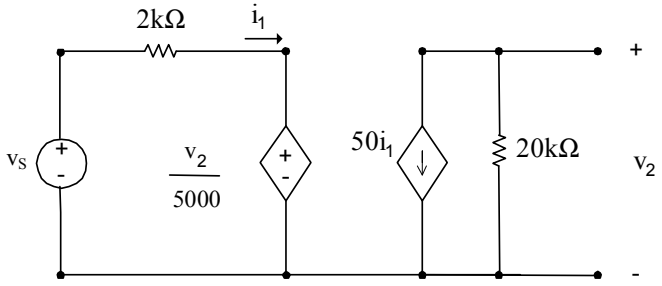


Figura 1.24 - Amplificador com um transistor de junção bipolar (TJB)

A figura 1.24 representa o circuito equivalente de um amplificador com um transistor de junção bipolar (TJB). Determine:

a) a tensão de saída em aberto, v_2, em função da tensão de excitação v_S;
b) a resistência equivalente de saída do amplificador (R_{th}).

PARTE II - Circuitos Lineares com Amplificadores Operacionais

Problema 2.1 - Amplificador não inversor (isolador)

Considere o amplificador da figura 2.1. A tensão, v_{in}, na entrada do amplificador operacional (A.O.), que se supõe ideal, é um sinal sinusoidal dado por $v_{in}=V_{im}\cos(\omega t-\phi)$ onde $V_{im}=3V$, $\omega=100\pi rad\ s^{-1}$ e $\phi=\pi/8$.

a) Trace o andamento de $v_{in}(t)$ e $v_{out}(t)$ entre 0 e 100ms para $R_2=4R_1$.
b) Repita a alínea anterior para $R_1=\infty$ e $R_2=0$.
c) Qual o valor da resistência de entrada do amplificador nas condições das alíneas anteriores? Comente a utilidade do circuito nas condições da alínea b).

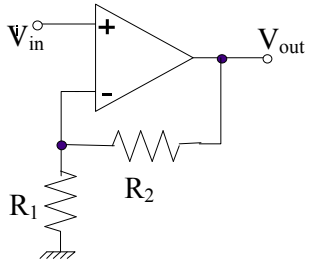


Figura 2.1 - Amplificador não inversor

Problema 2.2 - Amplificador inversor

Considerando que o Amplificador Operacional da figura 2.2 é ideal, e que satura para $v_0=\pm12V$, qual o valor da tensão de entrada v_S por forma a ter-se uma tensão nula em v_O ? Considere $i_S=1mA$ e $R=1k\Omega$.

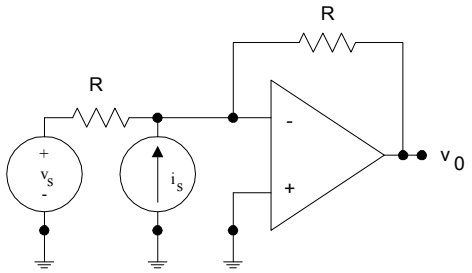


Figura 2.2 - Amplificador inversor

Problema 2.3 - Amplificador inversor

Usando um amplificador operacional ideal projecte um circuito amplificador com um ganho de tensão igual a –100 e uma resistência de entrada de 1kΩ.
Trace o seu esquema eléctrico, indicando o valor dos componentes.

Problema 2.4 - Amplificador inversor

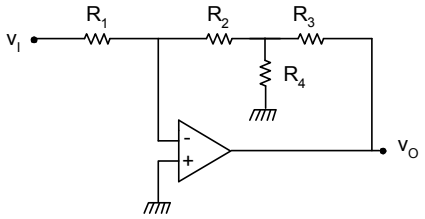


Figura 2.4 - Amplificador com realimentação em T

Calcule o ganho de tensão v_o/v_I do circuito da figura 2.4, onde se considera o amplificador operacional ideal. Qual a vantagem desta configuração em relação à montagem inversora clássica (só uma resistência de realimentação)?

Problema 2.5 - Amplificador de corrente

Considere o circuito da figura 2.5, onde o amplificador operacional é suposto ideal.
a) Analise-o e derive uma expressão para a corrente i_L em função das variáveis indicadas.
b) Uma fonte $v_s=2V$ em série com $R_S=1k\Omega$ é ligada ao terminal v_1. Se $R_1=100K\Omega$, $R_F=1M\Omega$ e $R_2=10k\Omega$, determine i_L.
c) Fazendo $i_1=v_1/R_1$, verifique que o circuito funciona como amplificador de corrente (i_L é independente de R_L).

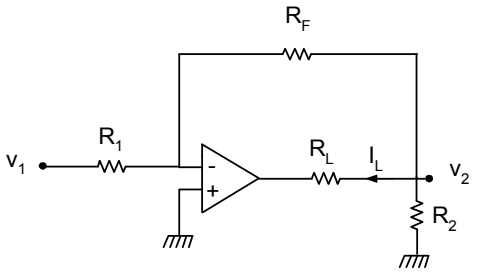
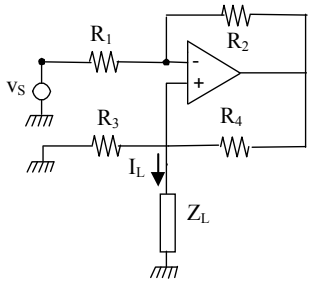


Figura 2.5 - Amplificador de corrente

Problema 2.6 - Fonte de corrente comandada por tensão



No circuito da figura 2.6, verifique que se $R_2/R_1=R_4/R_3$ o circuito é uma fonte de corrente (i_L) comandada por tensão (v_S) para uma carga Z_L com um dos terminais à massa. Considere o amplificador operacional ideal.

Figura 2.6 - Fonte de corrente comandada por tensão

Problema 2.7 – Amplificador somador e diferença

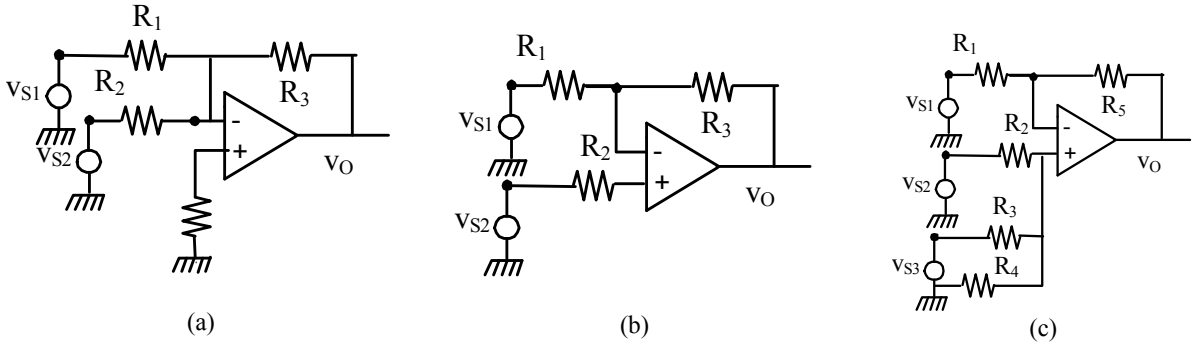


Figura 2.7 – Circuitos amplificadores com um amplificador operacional e mais de uma entrada

Para os circuitos da figura 2.7, calcule a expressão que relaciona a tensão de saída v_O com as tensões de entrada v_{Si}. Comente sobre a utilidade dos circuitos.

Problema 2.8 – Síntese de funções matemáticas com Amplificadores Operacionais

Obtenha circuitos com amplificadores operacionais que realizam as operações matemáticas que a seguir se descrevem. A menor resistência em cada circuito deve ser de 1kΩ.

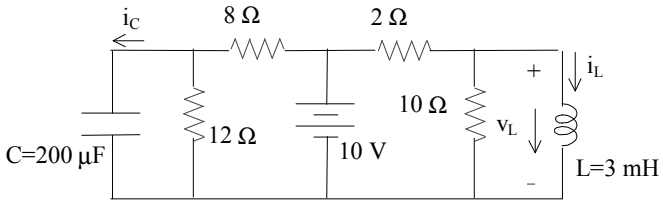
a) $v_O = v_{S1} + v_{S2} + v_{S3}$

b) $v_O = - v_{S1} + 2\ v_{S2} - 3\ v_{S3}$

PARTE III -Circuitos Dinâmicos Lineares

Problema 3.1 - Circuito LC em regime estacionário (dc)

Considere o circuito da figura 3.1, que representa uma rede RLC alimentada por um gerador de tensão contínua. Calcule as seguintes grandezas eléctricas, em regime estacionário:



a) Energia W_C no condensador C,

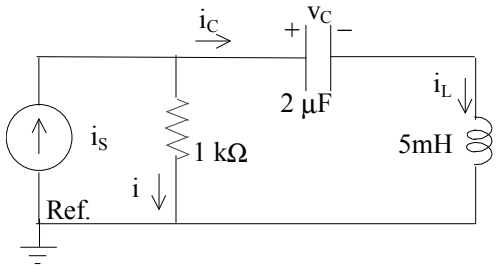
b) Energia W_L na bobina L,

c) As correntes nos ramos,

d) As tensões nos ramos.

Figura 3.1 - Rede LC com gerador dc

Problema 3.2 - Circuito RLC com fonte de corrente



Considere o circuito da figura 3.2, em que $i_s=2u(t)$ [A]. Admita que no instante inicial (t=0) se tem $v_C(0)=8V$ e $i_L(0)=3A$.

a) Escreva as equações nodais (integro-diferenciais) do circuito.

b) Escreva as equações das malhas.

Figura 3.2 – Circuito RLC com fonte de corrente

Problema 3.3 - Circuito RC com fonte dc e interruptor

Para o circuito da figura 3.3, determine em t=1s os valores das seguintes grandezas eléctricas:

a) Tensão no condensador v_C,

b) Tensão na resistência de 20Ω (v_R),

c) Tensão aos terminais do interruptor (v_{SW}).

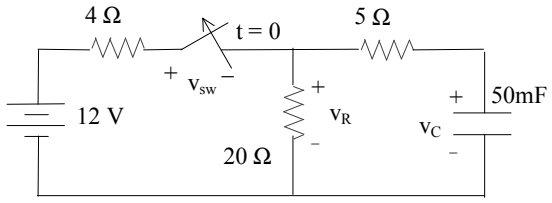


Figura 3.3 - Circuito RC com fonte dc e interruptor

Problema 3.4 - Circuito RL excitado por um escalão

Considere o circuito da figura 3.4, onde um ramo RL série é polarizado por uma tensão contínua de 10V e excitado por um sinal em escalão. Trace o andamento no tempo da corrente e da tensão na bobina $i_L(t)$ e $v_L(t)$.

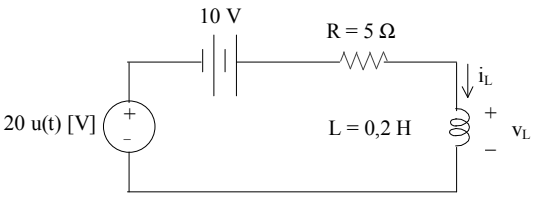
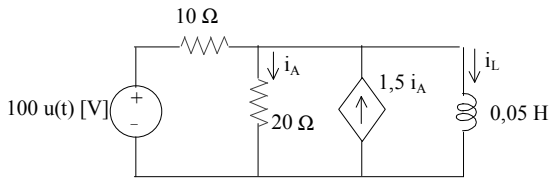


Figura 3.4 - Circuito RL excitado por um escalão

Problema 3.5 - Circuito RL com um gerador comandado

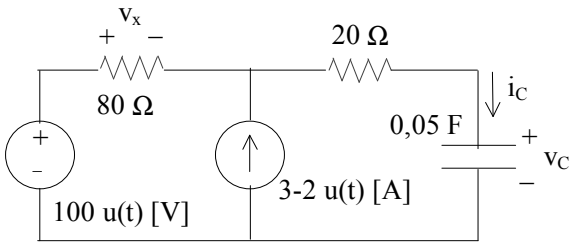


Considere o circuito RL da figura 3.5 que contém um gerador de corrente comandado e é excitado por um escalão de tensão.

Determine o andamento no tempo da corrente na bobina $i_L(t)$ para t>0.

Figura 3.5 - Circuito RL com gerador comandado

Problema 3.6 - Circuito RC excitado por dois escalões



Considere o circuito da figura 3.6 que inclui uma rede RC e dois geradores em escalão: um de corrente e um de tensão.

Determine o andamento no tempo das tensões $v_x(t)$ e $v_C(t)$, e da corrente $i_C(t)$ para todo o t.

Figura 3.6 - Circuito RC excitado por dois escalões

Problema 3.7 - Carga de um condensador

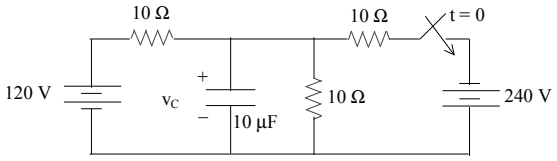


Figura 3.7 - Circuito RC com um interruptor e fontes dc

Considere o circuito da figura 3.7, onde em t=0 se fecha o interruptor. Admita que o interruptor estava aberto há muito tempo.

a) Determine a tensão $v_C(t)$ para t>0.
b) Em que instante se verifica $v_C(t)$=0 [V]?

Problema 3.8 - Carga e descarga dum condensador

No circuito da figura 3.8, admita que o comutador está há muito tempo na posição A. Move-se o comutador para B em t=0 e novamente para A em t=1s. Determine R_1 e R_2 de modo que se tenha para a tensão no condensador v_C=7.5V em t=1s e v_C=1V em t=1.001s.

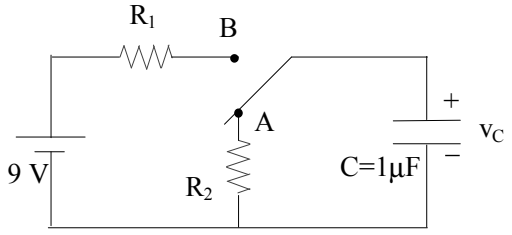


Figura 3.8 - Carga de um condensador a tensão constante

Problema 3.9 - Carga duma bobina

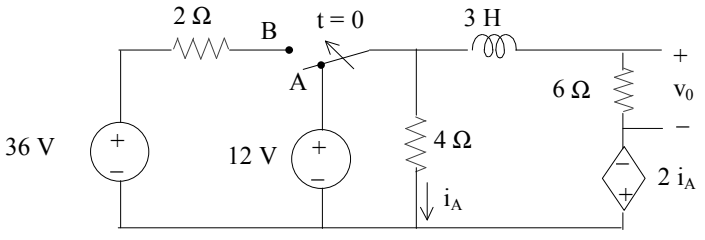


Figura 3.9 - Bobina comutada entre uma fonte de 12V e uma de 36V

No circuito da figura 3.9, a bobina de 3H que estava ligada a uma fonte dc de 12V em t=0 passa a estar ligada a uma de 36V com uma resistência interna de 2Ω. Calcule a expressão da tensão $v_0(t)$ para t>0.

Problema 3.10 - Carga simultânea de uma bobina e um condensador

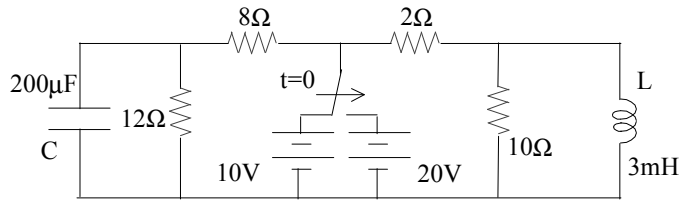


Figura 3.10 - Carga duma bobina e dum condensador em simultâneo

Para o circuito da figura 3.10, onde simultaneamente se comuta a carga do condensador C e da bobina L, determine as correntes, as tensões e as energias nestes dois componentes (i_L, i_C, v_L, v_C, w_L e w_C) em $t=0^-$, $t=0^+$ e $t=\infty$. O comutador é actuado em t=0.

Problema 3.11 - Carga dum condensador a corrente constante

Considere o circuito da figura 3.11 onde se supõe que o interruptor abre em t=0 e torna a fechar em t_1=15ms.

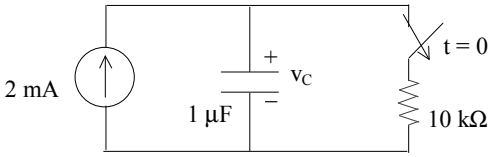


Figura 3.11 - Carga dum condensador a corrente constante

a) Calcule a potência fornecida pela fonte de corrente e a energia armazenada no condensador antes da abertura do interruptor ($t=0^-$).

b) Calcule a expressão da tensão $v_C(t)$ no intervalo $]0,t_1[$ e o seu valor em $t=t_1$.

c) Calcule a expressão da tensão $v_C(t)$ no intervalo $[t_1,\infty[$ e o seu valor em $t=2t_1$=30ms.

d) Represente graficamente $v_C(t)$, $i_C(t)$ e $i_R(t)$ no intervalo $]0,\infty[$. Considere como $t=\infty$, um valor de t tal que as grandezas a representar já sejam praticamente constantes.

e) Calcule a energia fornecida pela fonte e a energia dissipada na resistência no intervalo de tempo $]0,2t_1[$.

Problema 3.12 - Transitório da tensão num condensador

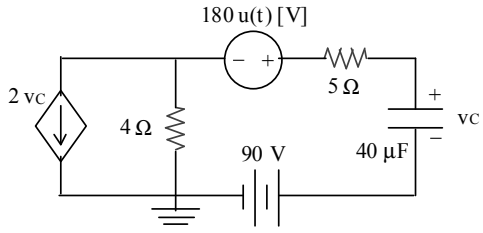
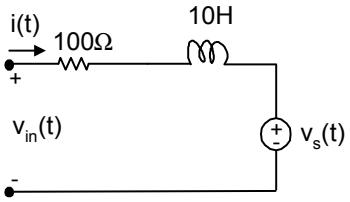


Figura 3.12 - Circuito de descarga com gerador comandado

Determine o instante t_0 em que se verifica o anulamento da tensão aos terminais do condensador da figura 3.12 [$v_C(t_0)=0$].

PARTE IV - Regime Forçado Sinusoidal

Problema 4.1 - Análise dum circuito RL no domínio da frequência



No circuito da figura 4.1, a fonte de tensão v_S é da forma $v_S(t) = 50\ \text{sen}(20t\text{-}53^o)$ [V]. Para obter $i(t) = 0{,}8\ \text{sen}20t$ [A], qual deve ser a tensão de entrada $v_{in}(t)$?

Figura 4.1- Circuito RL série

Problema 4.2 - Impedâncias complexas

No circuito da figura 4.2, considere que a tensão de excitação v é sinusoidal e de frequência angular ω=500rad/s.

a) Determine a tensão v (amplitude e fase) para que a corrente no condensador i_C tenha uma amplitude complexa $I_c=2\ e^{j30^o}$[A]. Qual é a expressão de v(t)?
b) Determine a impedância complexa aos terminais ±.

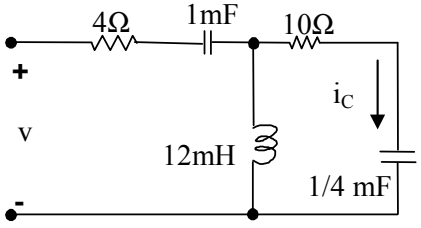
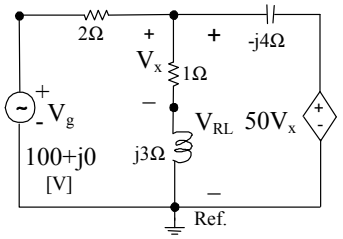


Figura 4.2 - Rede RLC

Problema 4.3 - Amplitudes complexas - Método nodal no domínio da frequência



Estude o circuito da figura 4.3 utilizando o método nodal. Determine a amplitude complexa da tensão V_{RL}, aos terminais da série RL.

Figura 4.3 - Circuito RLC em regime alternado sinusoidal

Problema 4.4 - Método das malhas no domínio da frequência

Escreva as equações das malhas para o circuito da figura 4.4. Sabendo que a corrente $i_S(t)=10\cos(10^4t+30^o)$, determine a corrente de malha $i_3(t)$.

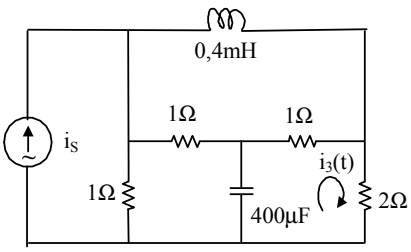


Figura 4.4 - Circuito RLC

Problema 4.5 - Diagrama de amplitudes complexas (vectorial)

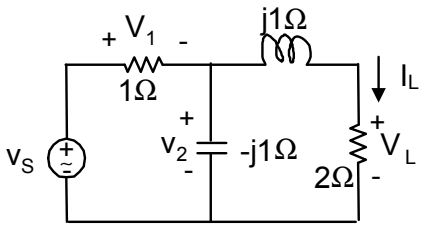


Figure 4.5 - Circuito RLC

a) Considere o circuito da figura 4.5. Escolhendo um valor de referência para I_L, trace o diagrama das amplitudes complexas de V_L, V_2, V_1 e V_S. Determine a razão entre os módulos das seguintes amplitudes complexas:

- V_1 e V_S
- V_2 e V_S
- V_L e V_S

b) Qual o valor de $i_L(t)$ quando $v_S(t) = \cos(\omega t)$, com ω=10rad/s?

Problema 4.6 - Função de transferência F(ω)

Considere o circuito da figura 4.6. Calcule o quociente entre as amplitudes complexas da tensão de saída v_o e da tensão do gerador v_s (função de transferência $F(\omega)=\left|\frac{\overline{V}_O}{\overline{V}_S}\right|$) em função da frequência angular ω. Esboce o gráfico de F(ω) determinando pontos que considere notáveis.

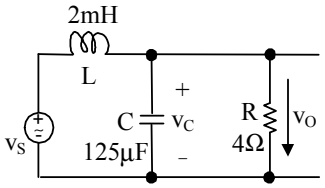


Figura 4.6 - Circuito RLC

Problema 4.7 - Adaptação de impedâncias

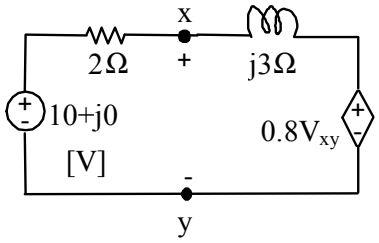


Figura 4.7 - Circuito RL com geradores

Determine o valor da impedância a ligar entre os terminais x e y da figura 4.7 para que esta absorva a máxima potência disponível no circuito (potência média).
Qual é o valor desta potência?

Sugestão: utilize o equivalente de Thévenin do circuito da figura em relação aos terminais xy.

Problema 4.8 - Método nodal / Sobreposição

No circuito da figura 4.8 as impedâncias são dadas em Ohm e as correntes em Ampere.

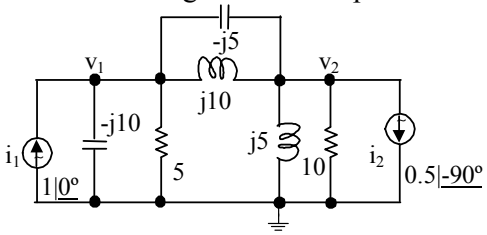


Figura 4.8 - Circuito RLC em Π

a) Calcule a expressão da tensão nos nós 1 e 2, sabendo que os geradores independentes i_1 e i_2 são sinusoidais e de frequência idêntica ω, caracterizados pelas respectivas amplitudes complexas $I_1=1|\underline{0º}$ [A] e $I_2=0.5|\underline{-90º}$ [A].

Sugestão: utilize o método nodal ou o princípio da sobreposição.

b) Trace o andamento no tempo das correntes $i_1(t)$ e $i_2(t)$ e das tensões $v_1(t)$ e $v_2(t)$.
c) A tensão v_1 está avançada ou atrasada em relação à tensão $v_2(t)$? E $i_1(t)$ em relação a $i_2(t)$? Comente.

Problema 4.9 - Equivalente de Thévenin. Máxima transferência de potência

No circuito da figura 4.9, as impedâncias são dadas em Ohm, a tensão em Volt e a corrente em Ampere.

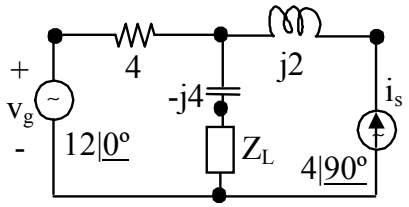


Figura 4.9 - Circuito RLC em T

a) Calcule a carga Z_L que proporciona a máxima transferência de potência média do circuito para essa carga.
b) Qual é o valor dessa potência?

Sugestão: utilize o teorema de Thévenin.

PARTE V - Domínio da Frequência Complexa s

Problema 5.1 - Função de transferência H(s)

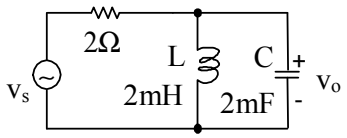


Figura 5.1 - Filtro LC passa-banda

Considere o circuito RLC representado na figura 5.1.

a) Obtenha a sua função de transferência $H(s)=V_o(s)/V_s(s)$..

b) Calcule os seus pólos e zeros e represente-os no plano complexo.

Problema 5.2 - Função de transferência. Frequência complexa. Diagramas de Bode

a) Para o circuito da figura 5.2, calcule as funções de transferência $K_1(s)=V_1(s)/I_s(s)$ e $K_2(s)=V_2(s)/I_s(s)$ e as suas singularidades (zeros e pólos).

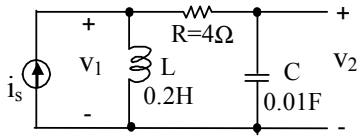


Figura 5.2 - Filtro passivo

b) Calcule a amplitude complexa de v_1 $(\overline{V_1})$ para uma excitação de amplitude complexa $\overline{I_s} = 5\ |\underline{70º}$, em Ampère, para as seguintes frequências complexas s: (1) 0; (2) j∞; (3) -20 s^{-1}; (4) j20 s^{-1}; (5) -10+j10 s^{-1}. Comente o significado dos resultados obtidos.

c) Se o gerador de corrente é uma sinusoide amortecida dada por $i_S(t) = 4\ e^{-10t}$ cos (5t +40°), calcule $v_2(t)$ em t=0 e t=0.25s.

d) Trace o diagrama de Bode de $K_1(\omega)$ e $K_2(\omega)$.

Problema 5.3 - Função de transferência. Diagrama de Bode

Um filtro com um amplificador operacional ideal (filtro activo) está representado na figura 5.3. Quatro dos componentes externos valem: $R_1=R_2=1k\Omega$, L=10mH e C=10μF.

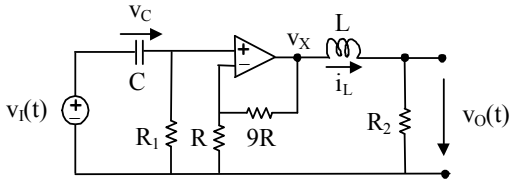


Figura 5.3 - Filtro activo LC

a) Calcule a função de tranferência $\overline{H}(s)=\dfrac{\overline{V_o}(s)}{\overline{V_i}(s)}$ evidenciando os polos e zeros.

b) Desenhe os diagramas de Bode assimptóticos (amplitude e fase) de $\overline{H}(j\omega)$.

c) Qual o valor de R_2, mantendo os restantes comoponentes o seu valor, para que $\overline{H}(s)$ apresente um polo duplo? Desenhe, de forma esquemática, o diagrama de Bode de amplitude para este caso. Qual o valor de $\left|\overline{H}(j100)\right|$?

Problema 5.4 - Função de transferência. Diagramas de Bode

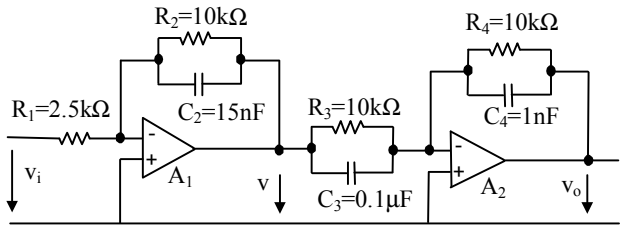


Figura 5.4 - Filtro RC activo

No circuito da figura 5.4 admita que os amplificadores operacionais A_1 e A_2 são ideais.

a) Calcule a função da transferência $F(s)=\dfrac{V_o}{V_i}$ do circuito. Qual o valor dos seus polos e zeros? Qual o seu valor na origem? Interprete este resultado.

b) Trace os diagramas de Bode, módulo e fase, da função de transferência calculada na alínea a).
c) Qual é a frequência de ganho de tensão unitário f_o ($|F(j2\pi f_o)|=1$) e a respectiva fase ($\phi_F(j2\pi f_o)$)?
d) Repita as alíneas anteriores se $C_2=0.1\mu F$, $C_4=3.3nF$ e $R_3=1k\Omega$.

Problema 5.5 - Diagramas de Bode

Um circuito tem a seguinte função de transferência: $G(s)=\frac{10^4 s}{(s+1)\ (s+10^4)}$

a) Trace os digramas de Bode (aproximação assimptótica) de $G(j\omega)$. Determine os valores de ω para que $|G(j\omega)|=\frac{|G(j100)|}{10}$

b) Calcule os valores exactos de ω onde $|G(j\omega)|=\frac{|G(j100)|}{\sqrt{2}}$

Problema 5.6 - Diagramas de Bode

Trace os diagramas de Bode (aproximação assimptótica) da seguinte função de transferência:

$$G(s)=\frac{1000s}{s^2+10s+400}$$

Qual é o seu tipo de filtragem? Comente.

Problema 5.7 - Diagramas de Bode

Para a aproximação assimptótica do diagrama de Bode de amplitude representado na figura 5.7, obtenha a respectiva função de transferência H(s). Qual o valor e ordem das singularidades (pólos e zeros)? Trace o respectivo diagrama de fase assimptótico.

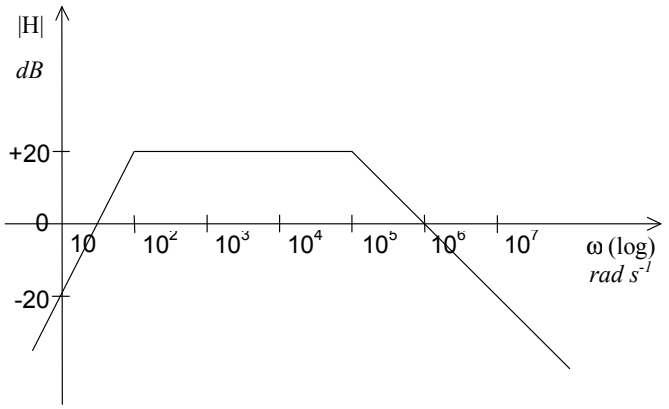


Figura 5.7 - Diagrama de Bode (amplitude) de um amplificador de banda larga

PARTE VI – Circuitpos não-lineares
Amplificadores Operacionais e Díodos

Problema 6.1 - Amplificador somador com saturação

Sabe-se que o amplificador operacional da figura 6.1 satura para $v_0 = \pm 16V$.

a) Se $v_2=1V$, $v_3=0$ e $v_1=V_{1m}\cos(\omega t)$, qual a amplitude máxima do sinal v_1 que leva o amplificador operacional ao limiar da saturação? Pode utilizar o princípio da sobreposição para a calcular? Justifique.

b) Para $v_1=v_2=0$, trace a característica $v_0(v_3)$ do circuito.

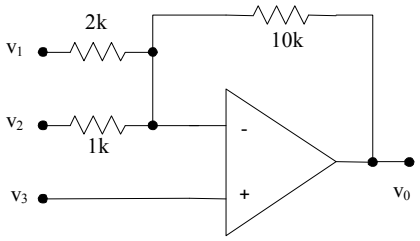
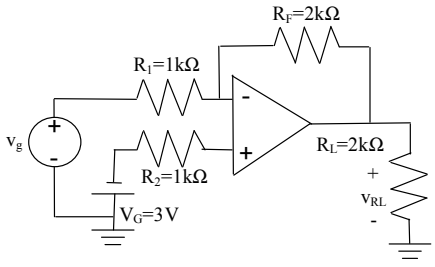


Figura 6.1 - Amplificador somador

Problema 6.2 - Amplificador somador com saturação



a) Supondo que o AO da figura 6.2 é ideal, a menos das tensões de saturação que valem ±10V, represente graficamente a característica de transferência $v_{RL}(v_g)$.

b) Explique o que significa a afirmação feita na alínea anterior "Supondo que o AO da figura 2 é ideal" tendo em conta os cálculos que efectuou na alínea anterior.

Figura 6.2 - Amplificador diferença

Problema 6.3 - Amplificador com dois AOs

Os dois amplificadores operacionais (A.Os.) da figura 6.3 estão polarizados com uma fonte dupla de ±12 V. A tensão de entrada, v_{in}, tem uma amplitude de 1V. Calcule a amplitude da tensão na saída de cada um dos amplificadores operacionais. Comente os valores obtidos.

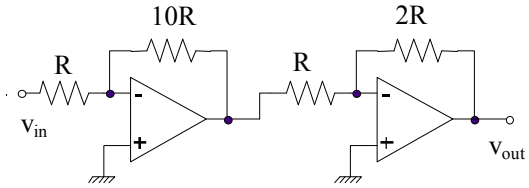


Figura 6.3 - Amplificador com dois A.Os.

Problema 6.4 -Amplificador inversor

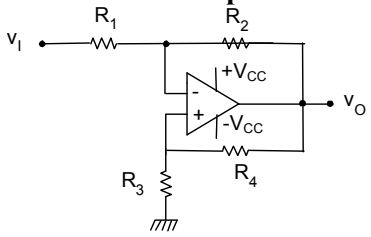


Figura 6.4 - Amplificador inversor

No circuito da figura 6.4 onde o amplificador operacional é ideal e:

$V_{CC}=\pm 15V$, $R_1=20k\Omega$, $R_3=10k\Omega$ e $R_2=R_4=100k\Omega$.

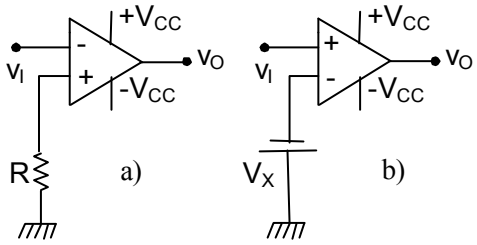
a) Determine a curva de transferência do circuito $v_O(v_I)$.

b) Com $R_2=R_4$ diga o que se altera na curva de transferência se:

i. - $R_1 = R_3$

ii.- $R_1 < R_3$

Problema 6.5 - Comparadores



Nos circuitos da figura 6.5 o amplificador operacional é ideal e:

$V_{CC}=\pm 15V$, $V_X=5V$, $R=10k\Omega$.

Determine as curva de transferência dos circuitos $v_O(v_I)$.

Figura 6.5 - (a) Detector de zero e (b) comparador.

Problema 6.6 - Comparador de Janela

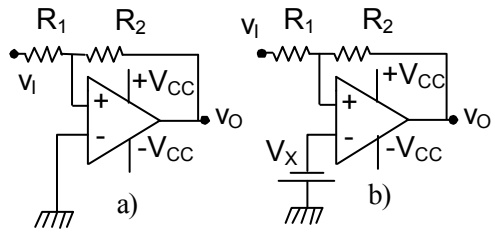


Figura 6.6 - Comparador de janela

Nos circuitos da figura 6.6 o amplificador operacional é ideal e:

$V_{CC} = \pm 15V$, $V_X = 5V$, $R_1 = 10k\Omega$ e $R_2 = 100k\Omega$.

Determine as curvas de transferência dos circuitos $v_O(v_I)$.

Problema 6.7 - Díodo de junção

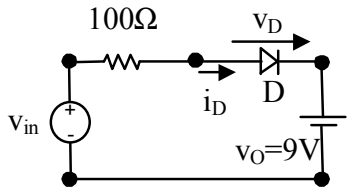


Figura 6.7 - Carregador de baterias

O circuito da figura 6.7 é um carregador de baterias de 9V elementar onde a tensão de alimentação v_{in} é sinusoidal de amplitude máxima 20V e frequência 50Hz, $v_{in}=20\text{sen}(2\pi 50t)$. Admita que o díodo D é ideal.

a) Represente graficamente as tensões v_{in} e v_D, e corrente i_D, indicando os respectivos valores máximos.
b) Que implica, nas especificações dum díodo real, os valores calculados na alínea anterior?

Problema 6.8 - Díodo de junção

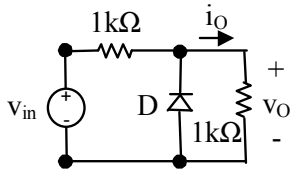


Figura 6.8 - Carregador de baterias

O circuito da figura 6.8 é excitado por uma tensão v_{in} triangular, de amplitude máxima 20V e periodo 20ms ($v_{in}>0$ de t=0 a 10ms). Admita que o díodo D é ideal.

a) Represente graficamente a tensão de entrada v_{in} e a tensão v_O e a corrente i_O, na carga de 1kΩ.
b) Qual é o valor máximo da tensão e corrente suportada pelo díodo.

Problema 6.9 - Lógica DR

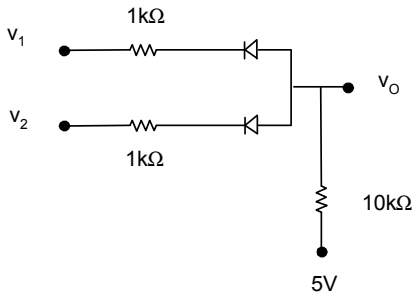


Figura 6.9 - Circuito E lógico (AND)

Assumindo para os díodos do circuito da figura 6.9 que $r_d=0$, $V_\gamma=0.7V$ e $r_r=\infty$, calcular a tensão de saída v_O nas seguintes condições de entrada:

a) $v_1 = v_2 = 5V$
b) $v_1 = 5V$, $v_2 = 0V$
c) $v_1 = v_2 = 0V$

Justificar o estado dos díodos em cada situação.

Problema 6.10 - Lógica DR

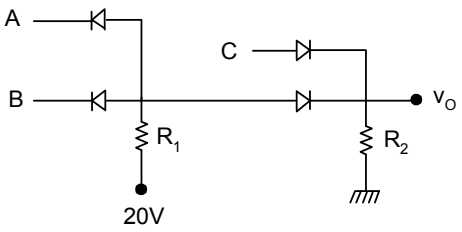


Figura 6.10 - Função lógica em tecnologia DR

Os valores binários das tensões de entrada do circuito da figura 6.10 são V(0)=0V e V(1)=10V. Assuma os díodos como ideais.

a) Analise o circuito e obtenha a função lógica f, $v_O=f(A, B, C)$.
b) Qual o valor mínimo de R_2 (em função de R_1) para que operação do circuito seja a prevista na alínea anterior?

Problema 6.11 - Díodos limitadores de tensão

Considere o circuito da figura 6.11 (a) em que os díodos D_1, D_2 e D_3 têm a característica apresentada na figura 2.21b .

a) Admita que a fonte i_G fornece 5mA ao circuito. Determine o valor da corrente i_{R3}.

b) Nas condições da alínea a), determine a tensão v_{D2}.

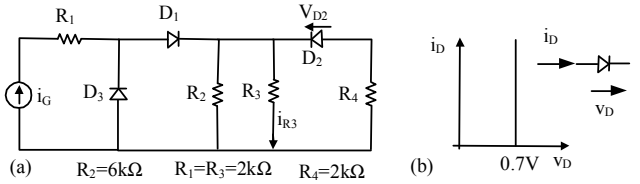


Figura 6.11 - (a) Circuito DR; (b) Característica i(v) dos díodos

c) Com $i_G=10\text{sen}\omega t$ (mA), $\omega=2\pi f$, f=100Hz, represente graficamente um período de i_G, de v_{D2} e de i_{RS}.

Problema 6.12 - Limitador a díodos

No circuito da figura 6.12 os díodos são ideais e $R_1=R_2=1k\Omega$.

a) Calcular e esboçar a curva de transferência $v_o(v_i)$.

b) Repita a alínea a) para a corrente em R_1 $i_{R1}(v_i)$ para $0<v_I<30V$.

c) Repita a alínea a) supondo agora que os díodos têm uma resistência directa $r_d = 0\Omega$, uma tensão de condução $V_\gamma= 0,7V$ e uma resistência inversa $r_r=\infty$.

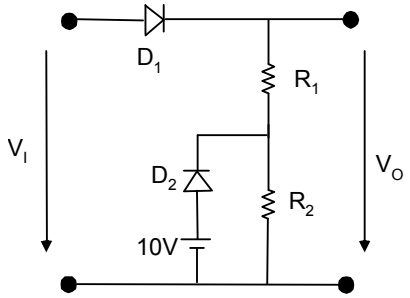


Figura 6.12 - Circuito limitador a díodos

Problema 6.13 - Limitador simétrico

Obtenha a característica de transferência $v_O(v_I)$ do circuito da figura 6.13 onde $V_B=5V$, $R=15k\Omega$ e $v_I=V_{Imax}\cos(2\pi ft)$ com $V_{i\,max}=10V$ e f=1kHz. Assuma que os díodos são ideais.

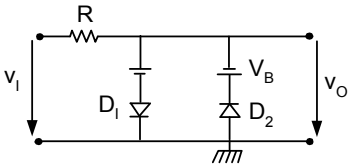


Figura 6.13 - Limitador simétrico

Problema 6.14 - E Lógico com isolador

Trace a curva de transferência $v_O(v_A)$ da porta lógica AND com isolador (*buffer*) representada na figura 6.14 sabendo que $v_A\in[0,5]V$. Justifique os resultados que obtiver.

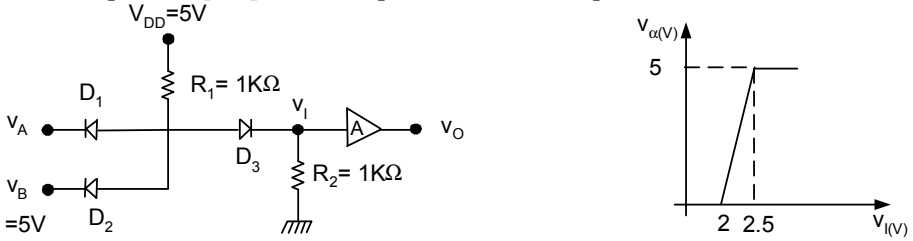


Figura 6.14 - Porta Lógica E com andar isolador na saída

PARTE VII - Problemas integrados e de recapitulação

Problema 7.1 - Integrador positivo

Considere o amplificador operacional da figura 7.1 ideal.

a) Prove que o circuito é um integrador positivo. Para o efeito calcule a relação entre a variável de saída v_o e a de entrada v_i.
b) Calcule a função de transferência do integrador da figura 7.1. Trace o respectivo diagrama de Bode assimptótico.

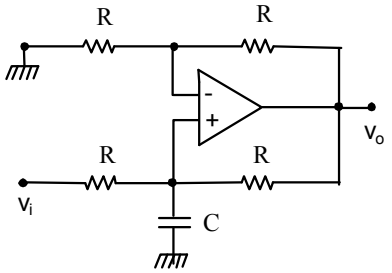


Figura 7.1 - Integrador positivo

Problema 7.2 - Equalizador de amplitude

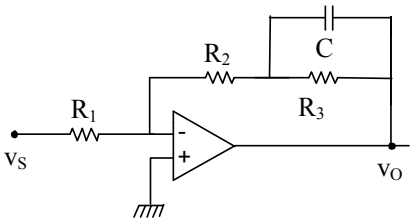


Figura 7.2 - Equalizador de amplitude

Para o circuito da figura 7.2, considerando que o amplificador operacional é ideal, calcule:

a) A relação $v_O(v_S)$ - domínio do tempo.
b) A relação $V_O(V_S)$ - domínio da frequência.
c) Trace o diagrama de Bode da função de transferência $H(s)= V_O/V_S$.

Problema 7.3 - Integrador com perdas

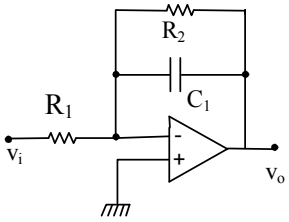


Figura 7.3 - Integrador

$C_1 = 11nF$

$V_{CC} = \pm 12V$

$R_1 = 1k\Omega$

$R_2 = 1M\Omega$

Suponha o amplificador operacional da figura 7.3 ideal.

a) Calcule a relação $v_O(v_I)$ e estude a sua resposta a uma onda quadrada de 10mV pp (pico a pico).
b) Trace o diagrama de Bode da função de transferência $H(s)= V_O/V_S$.
c) Qual a função do circuito e quais as vantagens relativamente a uma montagem sem R_2?

Problema 7.4 - Amplificador Operacional em regime não linear

Considere o circuito da figura 7.4, onde o amplificador operacional é suposto ideal.

a) Analise-o e esboce as formas de onda $v_O(t)$ e $v_C(t)$. Diga qual a sua função.

Sugestão: Considere que no instante t=0 o amplificador operacional está saturado e R=11kΩ (valor médio).

b) O que acontece às características dos sinais $v_O(t)$ e $v_C(t)$ quando se varia R?

$C = 11nF$

$V_{CC} = \pm 12V$

$R_1 = 10k\Omega$

$R_2 = R_3 = 33k\Omega$

R = Potenciómetro de 22kΩ

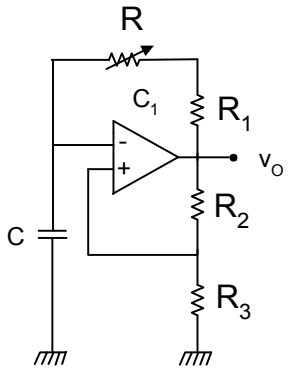


Figura 7.4 - Oscilador de relaxação

Problema 7.5 - Amplificador Limitador

O circuito da figura 7.5 utiliza um amplificador operacional alimentado com $V_{CC}=\pm 10V$, que se supõe ideal. Os componentes valem: $R_1=R_2=R_3=10k\Omega$ e $V_R = 2V$.

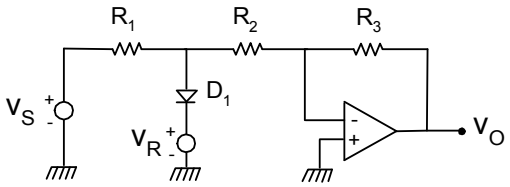


Figura 2.32 - Amplificador Limitador

a) Trace a curva de transferência $v_O(v_S)$ para $-10V \le v_S \le 10V$, supondo o díodo ideal. Qual a função deste circuito?
b) Repita a alínea anterior para um díodo com $V_{Don}=0.7V$ e $-30V \le v_I \le 40V$.

Problema 7.6 - Amplificador com desvio e limitação

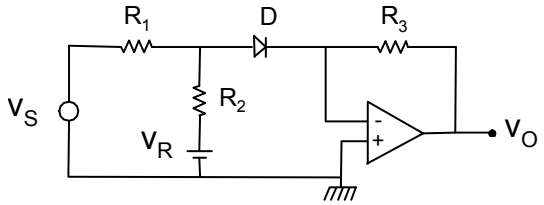


Figura 7.6 - Amplificador com desvio e limitação

O circuito da figura 7.6 utiliza um amplificador operacional ideal alimentado com $V_{CC}=\pm 15V$. Sabe-se que $R_1=10k\Omega$, $R_2=5k\Omega$, $R_3=33k\Omega$ e $V_R=3V$.

a) Trace a curva de transferência $v_O(v_S)$ para $-20V \le v_S \le 20V$, supondo o díodo ideal. Qual a função deste circuito?
b) Repita a alínea anterior para um díodo com $V_{Don} = 0.7V$.