

**TV
Universitária
do
Rio G. Norte**

**VÁLVULAS,
AMPLIFICADORES E
OSCILADORES**

COORDENADOR: PROF. ADAUTO GOUVEIA MOTTA
PROFESSOR: JEAN PAUL DUBUT

PALAVRAS INICIAIS

A demanda de técnicos com boa formação especializada, já está constituindo problema dentro do Rio Grande do Norte.

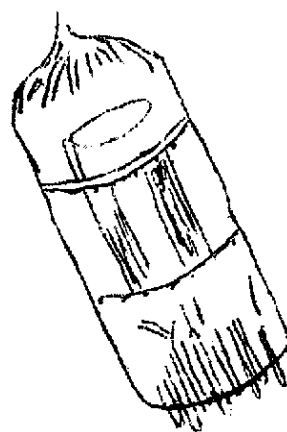
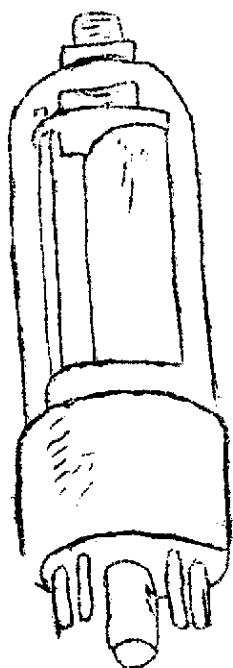
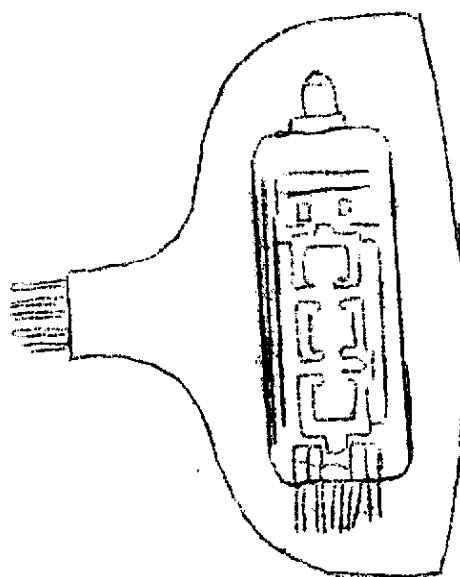
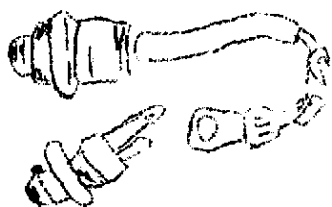
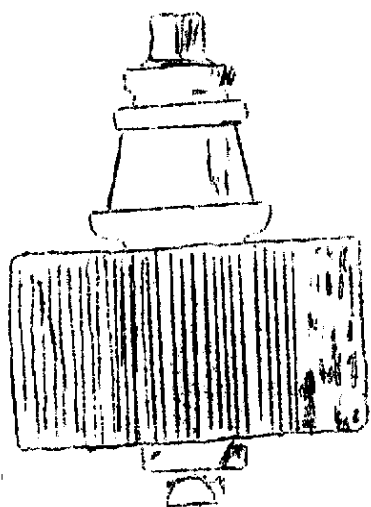
O estabelecimento da TV Universitária, a instalação da nova Estação Telefônica da TELERN, a ampliação da EMBRATEL, além da montagem de computadores, tudo isto criou uma procura elevada de profissionais no campo da Eletrônica e Eletricidade.

Esta situação conduziu-nos a propor ao Programa Intensivo de Preparação de Mão-de-Obra (PIPMO), um Curso que podesse atender, simultaneamente, às organizações interessadas.

Consequência: estamos ministrando mais um Curso de Televisão e Telecomunicações.

Para roteirizar os alunos, o Prof. JEAN-PAU DUBUT propôs a elaboração de uma apostila, que não tem outra pretensão que não a de deixar nas mãos dos estudantes um guia seguro para os seus estudos e pesquisas.

Natal, 11 de setembro de 1975
Direção da TV-U

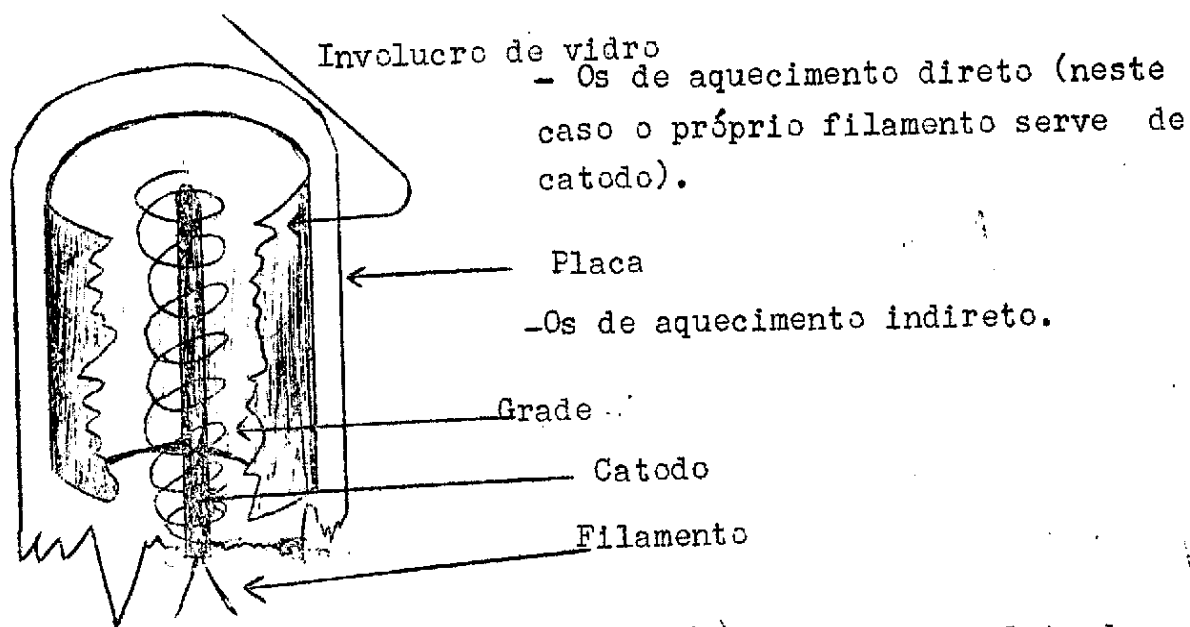


Os sinais utilizados em eletrônica nem sempre tem um nível compatível para uma utilização correta. Para isso será necessário aumentar a amplitude do sinal, o que será conseguido através de um "elemento" chamado amplificador. Nos capítulos a seguir estudaremos os amplificadores de valvulas a vácuo e dependendo do valor da amplificação desejada, utilizaremos valvulas: Triodo, Pentodo, Tetrodo.

TRIODO

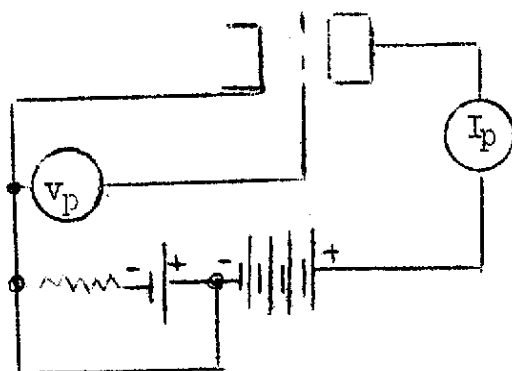
I) Funcionamento:

O triodo é uma valvula de vácuo de tres eletrodos, sendo um catodo, uma grade e uma placa. Torna-se evidente que o catodo, está aquecido por um filamento. Existem dois tipos de triodos:



Como estamos vendo a grade é geralmente um eletrodo enrolado em hélice, situado entre o catodo e a placa. Se estabelecermos uma D.D.P entre placa e catodo, de maneira que esta placa fica positiva em relação ao catodo; haverá então circulação de uma corrente i_p . Se agora aplicarmos uma certa tensão negativa na grade, a mesma sendo intercalada entre placa e catodo, repelirá uma porção de eletrons. Esta repulsão será tanto maior, quanto fôr maior a D.D.P negativa desta grade, e para um certo valor dessa D.D.P não circulará mais corrente na valvula. Chamaremos esse ponto de não condução, ponto de corte ou cut-off da valvula.

Estamos assim vendo que podemos controlar a corrente i_p em função da tensão, na grade da valvula e que essa corrente i_p também será função do potencial na placa do triodo.



II) Características do triodo:

1º) Resistência Dinâmica e Condutância:

Elas serão definidas da mesma maneira do que no diodo de vácuó, sendo:

$$r_p = \left[\frac{\Delta v_p}{\Delta i_p} \right]_{v_g = c^{te}}$$

$$g_p = \frac{1}{r_p} = \left[\frac{\Delta i_p}{\Delta v_p} \right]_{v_g = c^{te}}$$

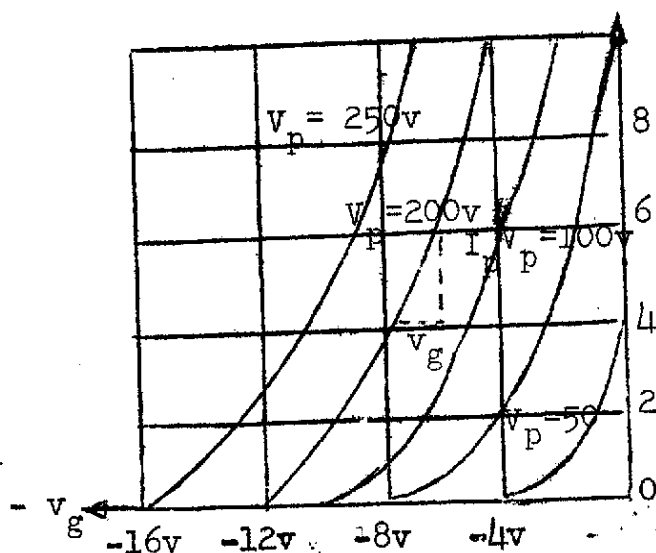
Convém notar que Δv_p e Δi_p são as variações incrementais correspondentes em v_p e i_p . Medidas em relação a tangente da curva (i_p, v_p) no ponto na qual r_p está sendo determinado, isso para um valor constante de v_g .

2º) Transcondutância:

Se para uma determinada tensão de placa, variarmos de Δv_g a tensão na grade, a corrente de placa sofrerá uma variação de Δi_p . Chamaremos a relação entre Δv_g e Δi_p de transcondutância do triodo, na região de característica considerada.

$$g_m = \left[\frac{\Delta i_p}{\Delta v_g} \right]_{v_p = c^{te}}$$

Podemos observar então, mais uma vez que a transcondutância traduz o efeito da variação da tensão de grade sobre a corrente de placa. Observando a figura abaixo podemos concluir que a transcondutância indica a inclinação da característica de transferência. Na região em que as curvas características são quase retilíneas, a transcondutância é sensivelmente constante. Geralmente as válvulas operam nesta região linear.



3º) Fator de amplificação:

Se fazemos variar de Δv_p a tensão de placa de uma válvula, conseqüentemente a corrente de placa i_p variará. Contudo, podemos fazer voltar a corrente de placa i_p ao valor anterior, variando a tensão de grade de um certo valor conveniente Δv_g em sentido contrário à variação da tensão de placa v_p .

Variando simultaneamente a tensão de placa de um valor Δv_p a corrente de placa ficará constante, e poderemos traduzir a eficiência de Δv_g sobre a tensão de placa v_p . Poderemos traduzir essa eficiência por um valor numérico que chamaremos de, fator de amplificação do triodo. Este fator será determinado para variações ao redor de um ponto sendo:

$$\mu = - \left[\frac{\Delta v_p}{\Delta v_g} \right]_{i_p = \text{cte}}$$

O sinal negativo é usado para obter um valor de μ positivo, pois as variações de Δv_p e Δv_g são sempre de sentido contrário. Os valores de μ são geralmente compreendidos entre 40 e 100.

II) Equivalência entre os parâmetros:

Demonstramos anteriormente que a corrente de placa I_p é função dos potenciais de placa e de grade. A corrente total de placa é geralmente composta por duas componentes: uma contínua, ou corrente de repouso I_{po} e uma variável que chamaremos i_p . A corrente total na placa será então:

$$i_{pt} = I_{po} + i_p$$

Como $I_{po} = C_{te}$ podemos dizer que:

$$i_p = \Delta i_{pt} = k_1 \Delta v_p + k_2 \Delta v_g \quad \text{ou}$$

$$i_p = \frac{\Delta i_{pt}}{\Delta v_p} \cdot \Delta v_p + \frac{\Delta i_{pt}}{\Delta v_g} \cdot \Delta v_g$$

Utilizando as derivadas parciais para expressar razões de variações relativas a uma variável de cada vez, poderemos expressar a equação acima por:

$$d. i_p = \frac{\partial i_p}{\partial v_p} \cdot dv_p + \frac{\partial i_p}{\partial v_g} \cdot d. v_g$$

Sabemos que:

$$g_p = \frac{1}{r_p} = \frac{\partial i_p}{\partial v_p} = \left[\frac{\Delta i_p}{\Delta v_p} \right]_{v_g} = C_{te}$$

$$g_m = \frac{\partial i_p}{\partial v_g} = \left[\frac{\Delta i_p}{\Delta v_g} \right]_{v_p} = C_{te}$$

Podemos observar que se i_p for conservado constante, $d. i_p$ na equação será igual a zero e:

$$-\left[\frac{d v_p}{d v_g} \right] i_p = C_{te} = \frac{\frac{\partial i_p}{\partial v_g}}{\frac{\partial i_p}{\partial v_p}} = \frac{g_m}{g_p} \Rightarrow = g_m r_p$$

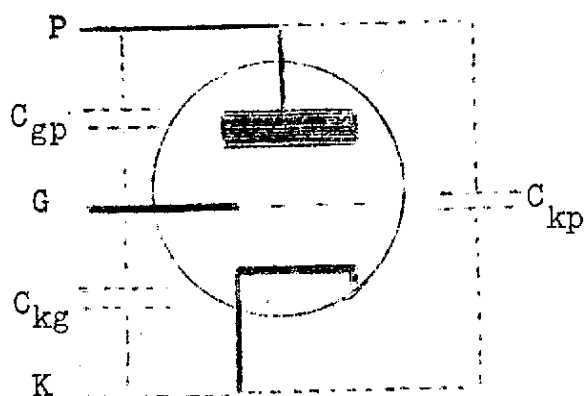
$$\text{mas, } \frac{v_p}{v_g} = \frac{g_m}{g_p} = g_m \cdot r_p$$

$$\mu = g_m \cdot r_p$$

Assim sendo, conhecidos dois dos parâmetros poderemos determinar o terceiro.

III) Capacidade inter-eletrodica do triodo:

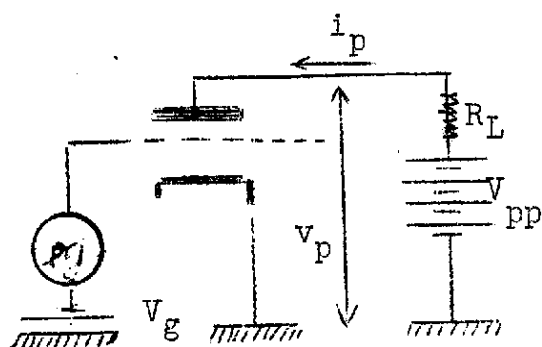
As principais limitações de um triodo como amplificador, é devido ao fator do triodo apresentar uma capacidade grade-placa relativamente elevada.



Se a variação Δv_p na placa é grande em relação a Δv_g , essa variação Δv_p pode realimentar a grade pelo intermédio da capacitância C_{gp} e ser amplificado novamente. Outra limitação também apresentada por um triodo funcionando nas frequências altas, é a grande capacitância aparente nos terminais de entrada sob condi-

ções de funcionamento dinâmico do triodo.

IV) Triodo amplificador:



Se ligarmos um triodo na configuração seguinte, sendo a grade polarizada a um certo valor negativo e a placa ligada a uma fonte tensão contínua, através de uma resistência de carga, circulará uma certa corrente I_p ; Se fizermos variar a tensão de grade, a corrente I_p passará a sofrer variações da mesma ordem, sendo que um aumento negativo da tensão de

grade provocará uma diminuição da corrente I_p e inversamente.

A corrente passando através da resistência determinará uma queda de potencial que será proporcional ao valor desta corrente. Como pequenas variações da tensão de grade provoca grandes variações na corrente de placa, a tensão nos terminais da resistência - obteremos também grandes variações de tensão. Contudo defasadas de 180° , pois um aumento de v_g provoca uma diminuição de i_p .

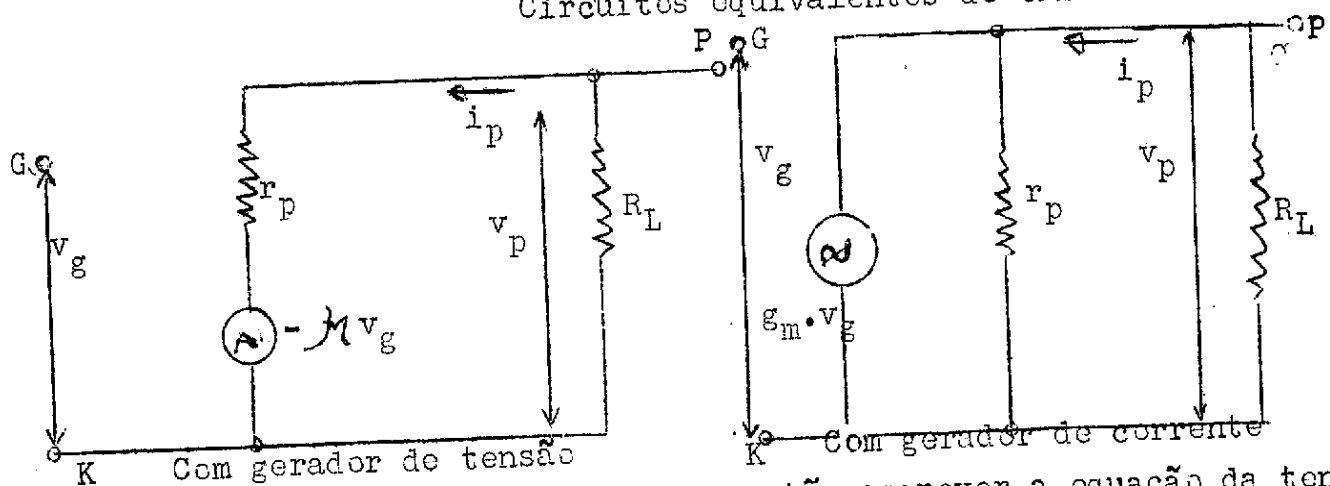
Poderemos então escrever a equação da malha sendo:

$$V_{pp} = R_L \cdot i_p + v_p \implies$$

$$-V_{pp} + R_L \cdot i_p + v_p = 0$$

Para simplificar os calculos podemos representar o triodo por um circuito equivalente CA, como um gerador de tensão ou de corrente.

Circuitos equivalentes do triodo.



Para o gerador de tensão podemos então escrever a equação da tensão v_p sendo:

$$v_p = r_p \cdot i_p - \mu \cdot v_g$$

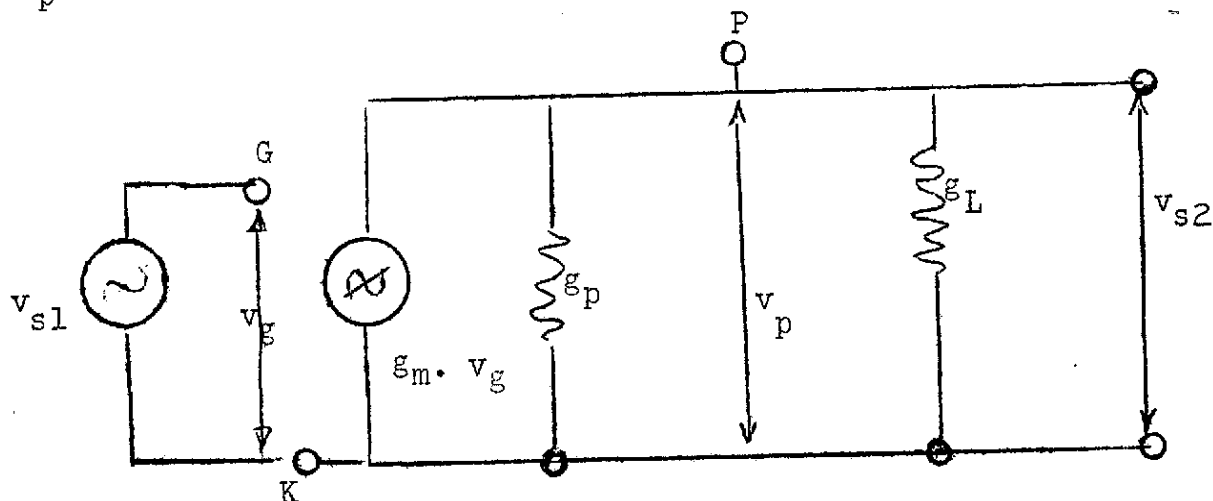
e para o gerador de corrente:

$$i_p = \frac{v_p}{r_p} + g_m \cdot v_g$$

1º) Circuito equivalente com gerador de corrente:

Podemos também representar o circuito equivalente com gerador de corrente em função das conductâncias sendo:

g_p : condutância de placa, g_L , condutância da carga.



A equação do circuito de grade:

$$-v_{sl} + v_g = 0 \implies v_{sl} = v_g$$

A equação do circuito de placa:

$$g_m \cdot v_g + g_p \cdot v_p + g_L \cdot v_p = 0 \implies$$

$$-g_m v_g = g_p \cdot v_p + g_L v_p \text{ mas, estamos vendo que } v_p = v_{s2}$$

$$-g_m v_g = g_p \cdot v_{s2} + g_L \cdot v_{s2}$$

$$-g_m v_g = v_{s2} (g_p + g_L)$$

$$\text{Como } v_g = v_{sl} \quad -g_m v_{sl} = v_{s2} (g_p + g_L)$$

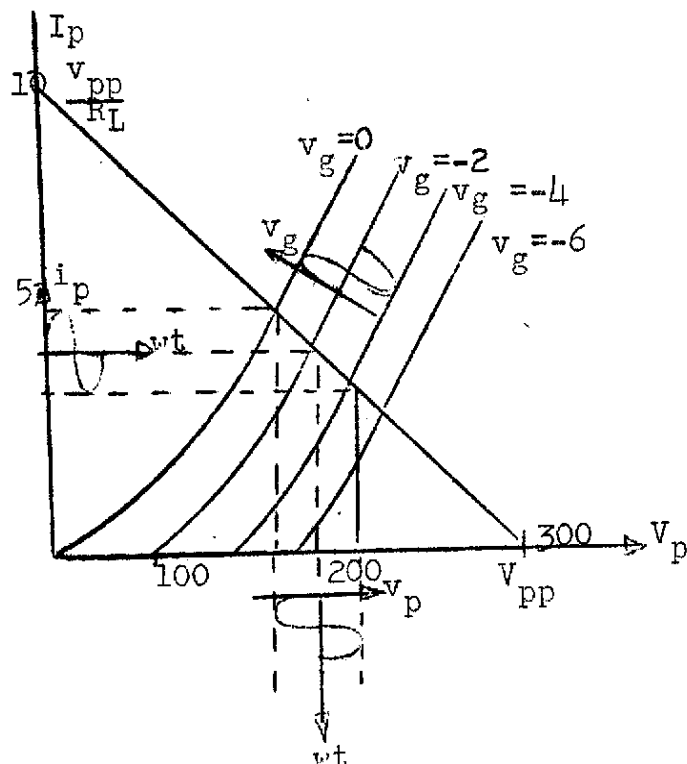
$$v_{s2} = v_{sl} \cdot \left(\frac{-g_m}{g_p + g_L} \right)$$

Tendo determinado a tensão de saída nos terminais da resistência de carga R_L em função da tensão de entrada e dos parâmetros da válvula. Podemos definir então o ganho de tensão do circuito sendo:

$$A_v = \frac{v_{s2}}{v_{sl}} = \frac{v_{sl} \left(\frac{-g_m}{g_p + g_L} \right)}{v_{sl}}$$

$$A_v = \frac{-g_m}{g_p + g_L}$$

* Determinação gráfica:



Podemos determinar pelo método gráfico a amplificação da válvula utilizando a característica $I_p = f(V_p)$ para $V_g = C^{te}$. Para isso basta traçar a reta de carga fazendo $I_p = 0$

e $I_p = \frac{V_{pp}}{R_L}$ abaixando os pontos obtidos pela variação de v_g sobre a reta de carga, obteremos os valores correspondentes de v_p e i_p .

* Ponto de repouso:

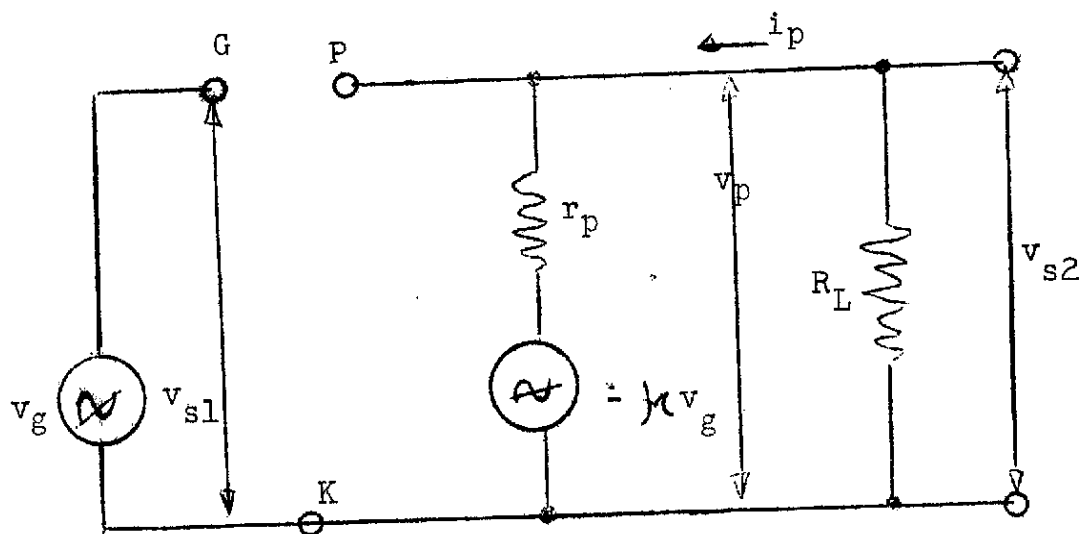
Será o ponto da característica escolhido em torno do qual aplicaremos a tensão senoidal ou seja, os valores que terão a corrente e a tensão quando não será aplicado sinal na grade.

2º) Circuito equivalente com gerador de tensão:

Vimos anteriormente que o ganho de tensão A_v era dado por:

$$A_v = \frac{-g_m}{g_p + g_L}$$

Contudo, em algum caso torna-se mais conveniente de utilizar um circuito equivalente com gerador de tensão.



A equação da malha de grade é:

$$-v_{s1} + v_g = 0 \implies v_g = v_{s1}$$

A equação da malha de placa é:

$$R_L \cdot i_p + v_p \cdot i_p - \mu v_g = 0$$

$$i_p (R_L + r_p) - \mu v_g = 0$$

$$\text{mas, } v_g = v_{s1} \implies$$

$$i_p (R_L + r_p) - \mu \cdot v_{s1} = 0$$

$$\implies i_p (R_L + r_p) = \mu \cdot v_{s1}$$

$$i_p = \frac{\mu \cdot v_{s1}}{(R_L + r_p)}$$

$$\text{Como } v_{s2} = -R_L \cdot i_p \implies v_{s2} = -R_L \cdot \left(\frac{\mu \cdot v_{s1}}{R_L + r_p} \right)$$

$$A_v = \frac{v_{s2}}{v_{s1}} = \frac{-R_L \left(\frac{\mu \cdot v_{s1}}{R_L + r_p} \right)}{v_{s1}}$$

$$\Delta v = - \frac{R_L \cdot \mu}{R_L + r_p}$$

V) Polarização das válvulas amplificadoras:

Temos visto que para um funcionamento linear da válvula precisamos polarizar a sua grade a um certo valor negativo de maneira que o sinal aplicado possa excitar v_g em torno do ponto de repouso sem que haja corrente de grade. Essa configuração terá a vantagem de proporcionar um funcionamento linear, mas em contraparte o rendimento será baixo, pois haverá corrente de placa durante o período inteiro. Para certas aplicações não necessitaremos desta linearidade e serão escolhidos outros pontos de funcionamento.

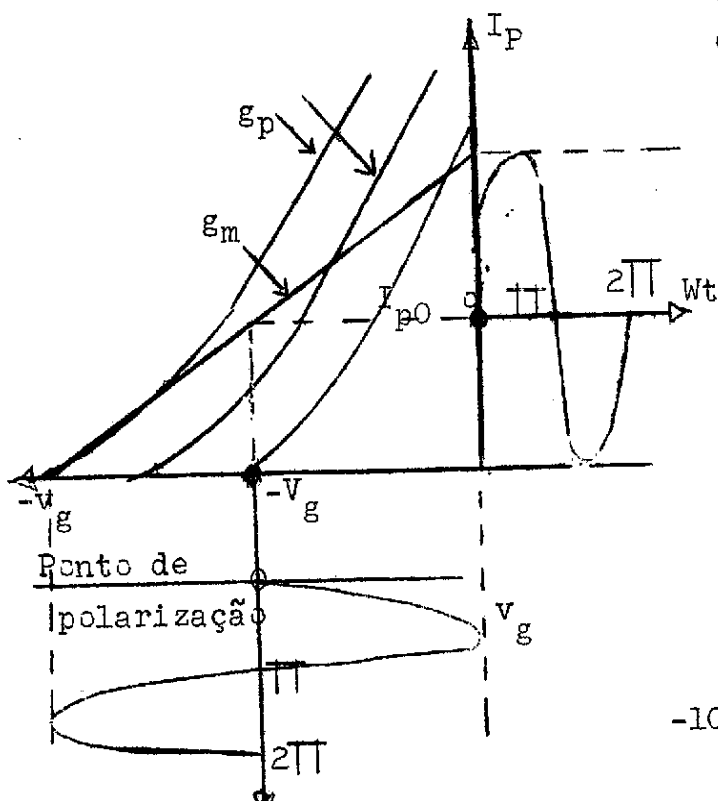
Poderemos dividir o funcionamento dos amplificadores, em tres classes principais sendo: A, B, C.

1ª) Classe A:

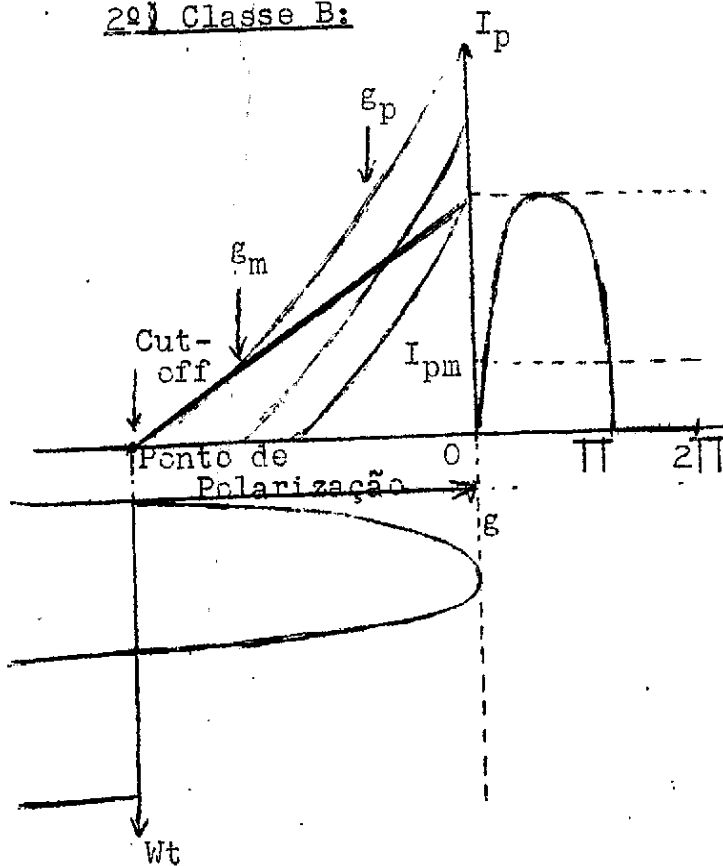
O ponto de polarização é tal que a corrente de placa, circula durante o tempo de excitação da grade. A componente alternativa i_p será então proporcional a v_g e a componente média da corrente:

$$I_{pm} = \frac{2}{\pi} I_{p0} \approx C_{te}$$

Essa classe de funcionamento proporciona uma resposta praticamente linear.



29) Classe B:

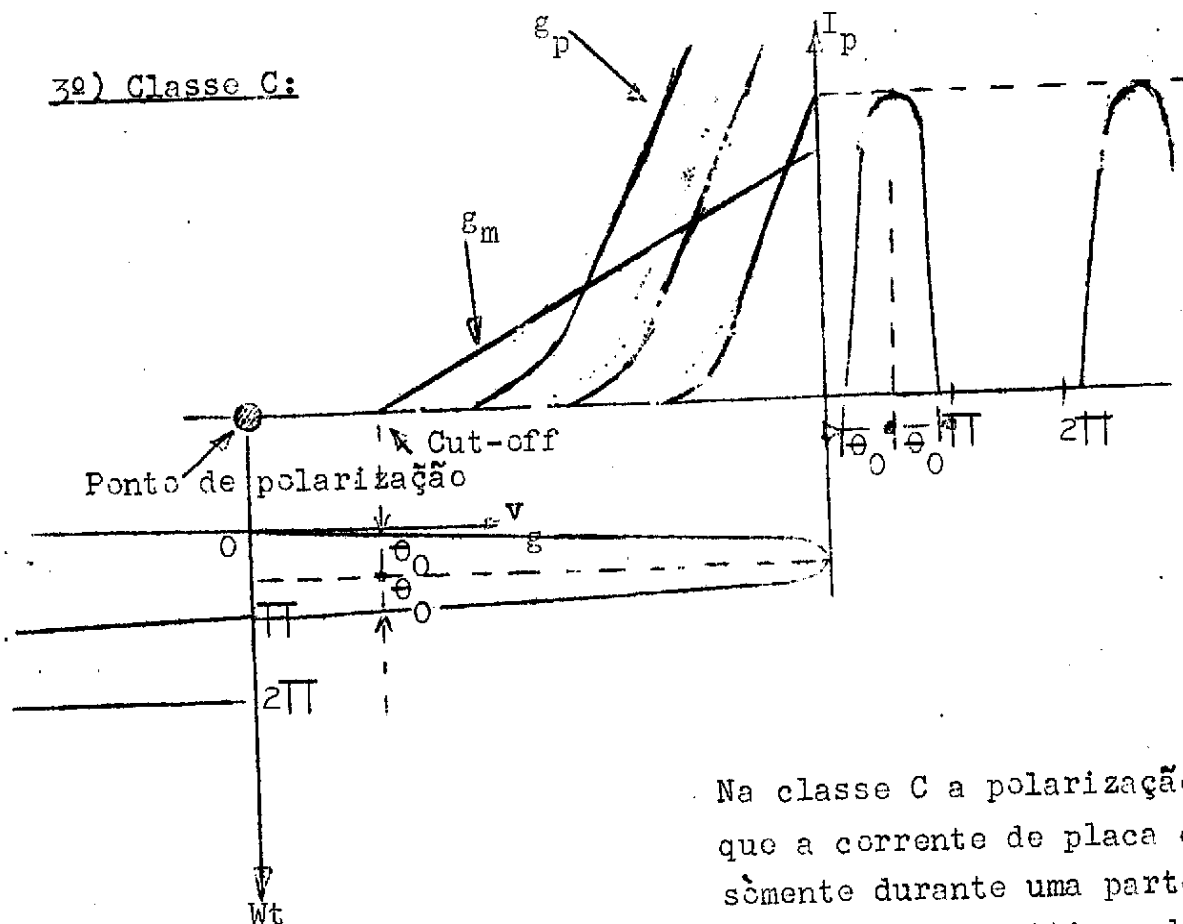


Em classe B o ponto de polarização é tal que a corrente de placa circula somente durante o meio ciclo positivo do ciclo de excitação da grade. A corrente de placa fica então sendo uma corrente pulsada - cujo valor médio é:

$$I_{pm} = \frac{I_{pM}}{\pi}$$

Na classe B o ponto de repouso da polarização de grade fica então - situado no ponto de corte ou cut-off. Sem sinal a valvula não conduzirá, conseqüentemente não circulará corrente I_p . A resposta não será linear.

30) Classe C:



Na classe C a polarização é tal que a corrente de placa circula - somente durante uma parte dos - meios ciclos positivos de excitação da grade. O ângulo de passagem $\theta = 2\theta_0$ será então $\theta < \frac{\pi}{2}$ geralmente, compreendido entre 60° e 70°.

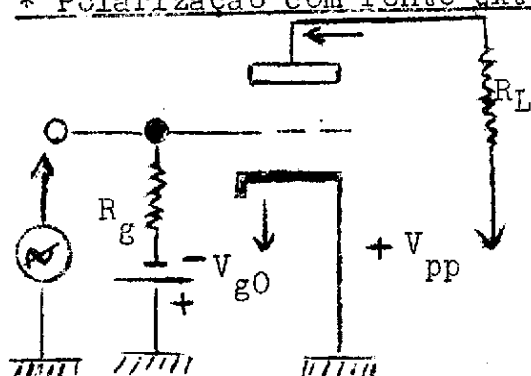
A corrente de placa I_p comportará então todos os harmônicos do sinal aplicado na grade sendo:

$$i_p = I_{pm} + I_p \cos \theta + I_p \cos 2\theta + I_p \cos 3\theta + \dots + I_p \cos n\theta$$

4º) Dispositivos para polarização da grade:

Temos visto que há necessidade de um ponto de polarização da grade de comando. Para isso poderemos utilizar vários sistemas:

* Polarização com fonte externa:

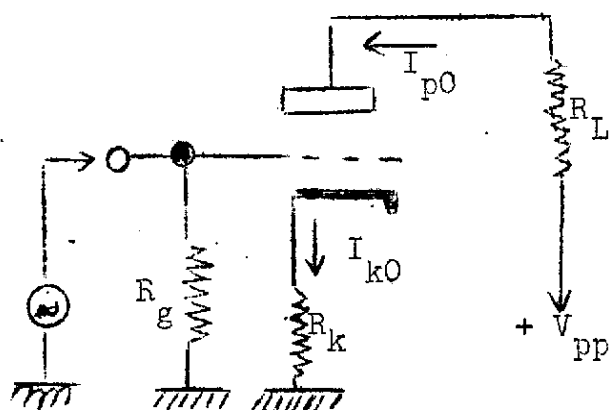


Neste sistema a polarização é obtida pelo intermédio de uma fonte externa. Para aumentar a impedância de entrada coloca-se uma resistência R_g em série, com a pilha e se não obtiver corrente de grade a tensão da pilha V_{g0} se encontrará na grade, pois não terá

corrente e conseqüentemente não haverá queda de tensão na mesma.

Esse sistema poderá ser utilizado para polarização em classes A, B e C, contudo tem a desvantagem de necessitar uma fonte auxiliar.

* Polarização por resistência de catodo:



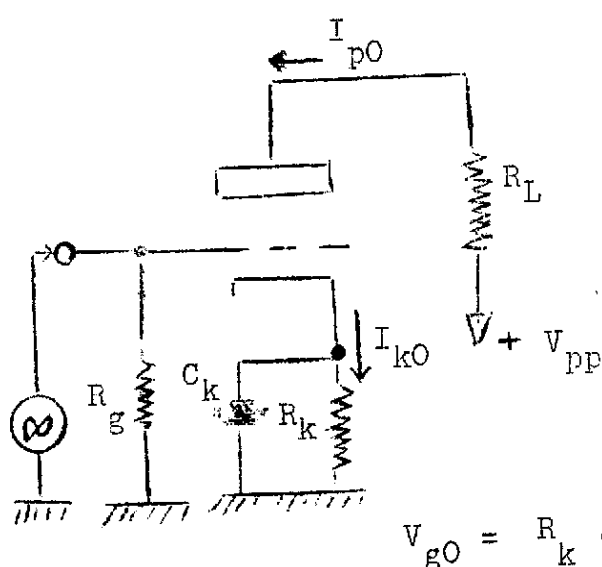
Se admitimos que a corrente de placa de repouso I_{p0} não é nula. Seja que os amplificadores não funcionam nas classes B ou C e que não tiver corrente de grade, a corrente de catodo será a mesma que a corrente de placa. Se colocarmos um resistor de baixo valor, no circuito de catodo, a corrente a-

travessando esta resistência R_k determinará um certo potencial nas suas extremidades.

Consequentemente o catodo se encontrará a um certo potencial positivo, em relação a massa. Ligando a grade através de uma resistência de alto valor à massa como não circula corrente, a grade ficará então ao potencial da massa.

Como temos visto que o catodo fica elevado a um certo potencial positivo, para todos os efeitos a grade será negativa em relação ao catodo. Obteremos assim, determinando os valores de R_k a polarização desejada. Contudo, isso só será possível na classe A, pois a condição é que $I_{p0} = I_{k0} \neq 0$.

* Calculo da resistência de polarização por corrente catodica num triodo:



Admitindo que o amplificador trabalha sem corrente de grade (sendo que o sinal nunca passará para um valor positivo de v_g). Poderemos escrever que:

$$I_{p0} = I_{k0}$$

Fixando o ponto de polarização V_{g0} podemos então dizer que:

$$V_{g0} = R_k \cdot I_{k0} \Rightarrow$$

$$R_k = \frac{V_{g0}}{I_{k0}}$$

Contudo quando o amplificador estiver em funcionamento dinâmico se já que aplicarmos um sinal na grade, a corrente I_p mudará de valor conforme o sinal na grade. Consequentemente o ponto de polarização variará, pois $v_g = v_k = I_{p0} R_k \pm i_p R_k$. Haverá então a necessidade de fixar o ponto de operação e para isso pode-se utilizar um condensador de alto valor, de maneira que o mesmo armazena uma certa carga e assim a tensão V_k ficará sensivelmente constante.

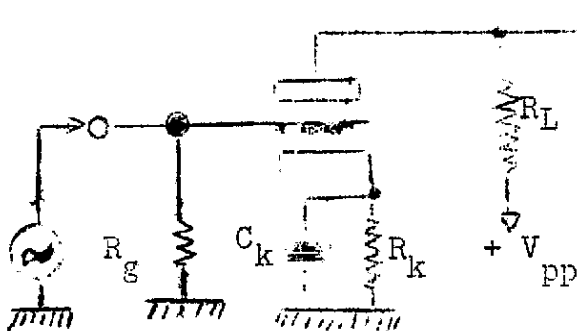
Praticamente, para que $V_k \approx C_k$
 $X_{ck} \leq \frac{1}{10} \cdot R_k$, isso para a menor frequência do sinal de comando.

$$\frac{1}{C_k \cdot 2\pi \cdot f} \leq \frac{1}{10} R_k \Rightarrow$$

$$\frac{10}{R_k \cdot 2\pi \cdot f} \leq C_k \Rightarrow C_k \geq \frac{1,6}{R_k \cdot f}$$

VI) Configuração dos amplificadores:

1º) Amplificador de catodo comum:

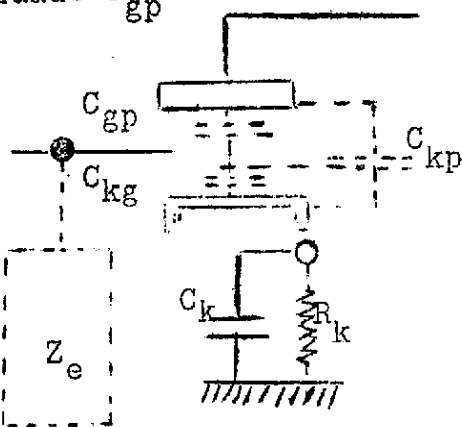


É a configuração mais utilizada - pois o ganho em potência e tensão é relativamente alto. O sinal é aplicado entre grade e catodo sendo retirado entre placa e catodo.

Para haver transferência máxima de potência $R_L \approx r_p$ e o ganho de tensão será:

$$A_v = - \frac{\mu \cdot R_L}{r_p + R_L}$$

A resistência de entrada da valvula será devido essencialmente à de energia ativa entre o circuito de entrada e de saída pela capacidade C_{gp} sendo:



$$R_e = \frac{1}{C_{gp} \cdot W \cdot A_v \cdot \sin \phi}$$

e a capacitância de entrada da valvula:

$$C_e = C_{gk} + C_{gp} (1 + A_v \cdot \cos \phi)$$

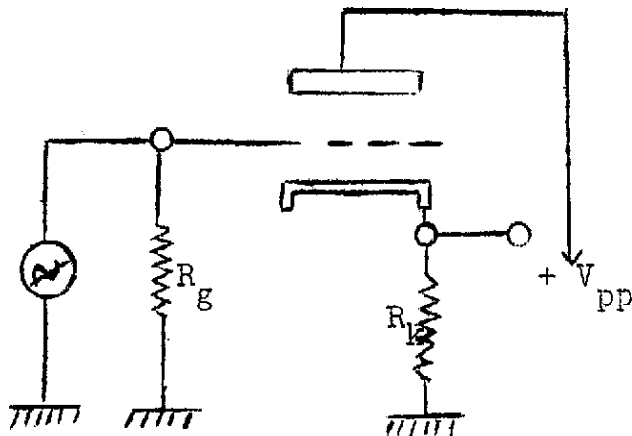
A impedância de entrada da valvula será então:

$$Z_e = \sqrt{R_e^2 + \left(\frac{1}{C_e \cdot W} \right)^2}$$

Se o circuito de grade comportar uma resistência R_g a impedância torna-se:

$$Z_{et} = \frac{Z_e \cdot R_g}{Z_e + R_g}$$

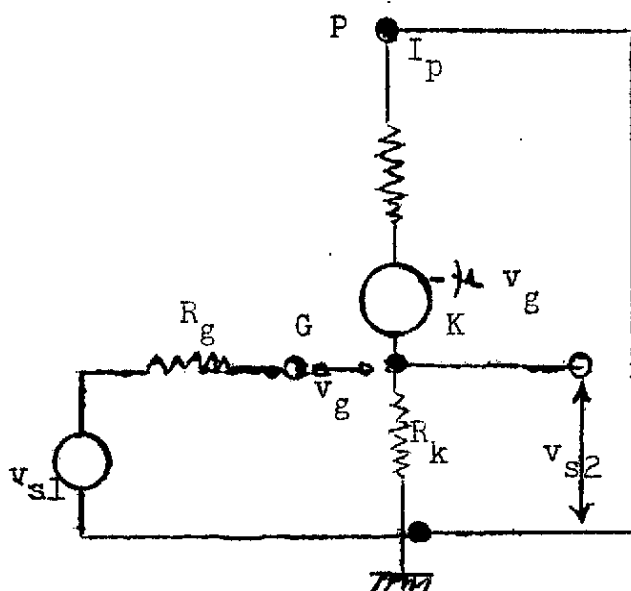
2º) Amplificador "Catodo Follower" ou seguidor de catodo:



Esse tipo de amplificador não possui resistência de placa R_L , nem condensador no catodo, pois o sinal será retirado do mesmo, a entrada sendo feita na grade. Considerando somente a componente CA, estamos vendo que a placa se encontrará ao potencial da massa. Para os valores médios podemos então determinar o ponto de funcionamento escrevendo a equação de grade:

$$v_{s1} - R_k i_p - v_g = 0 \Rightarrow$$

$$v_g = v_{s1} - R_k i_p = v_{s1} - v_{s2}$$



A tensão de saída v_{s2} será então:

$$v_{s2} = R_k \cdot i_p \Rightarrow$$

$$v_{s2} = R_k \cdot \frac{\mu \cdot v_g}{R_k + r_p}$$

Trocando na equação o valor de v_g , teremos:

$$A_v = \frac{v_{s2}}{v_{s1}}$$

$$A_v = \frac{\mu \cdot R_k}{R_k (\mu + 1) + r_p}$$

Na configuração catodo Follower estamos vendo que não há rotação de fase entre a tensão de entrada e a de saída. Esta tensão será tomada na resistência de catodo R_k e o seu valor será igual a $R_k \cdot I_p$. A componente variavel da corrente será também em fase com a tensão de entrada. Outra particularidade é que o ganho de tensão é inferior à unidade, isso não querendo dizer que o ganho de potência não seja superior à unidade. Essa configuração será utilizada como adaptador de impedâncias, pois a entrada é muito elevada e a impedância de saída muito baixa.

Para calcular a resistência de saída do catodo Follower, vamos supor que a tensão de entrada $v_{s1} = 0$. Se aplicarmos um gerador de tensão v_0 entre os terminais de saída, verificaremos que este gerador passará a fornecer uma certa corrente i_0 ao circuito.

$$i_0 = \frac{v_0}{R_k} + \frac{v_0 - \mu \cdot v_g}{r_p}$$

mas como $v_g = -v_0$ pois $v_{s1} = 0$

$$\text{teremos: } i_0 = v_0 \left[\left(\frac{1}{R_k} \right) + \left(\frac{1 + \mu}{r_p} \right) \right]$$

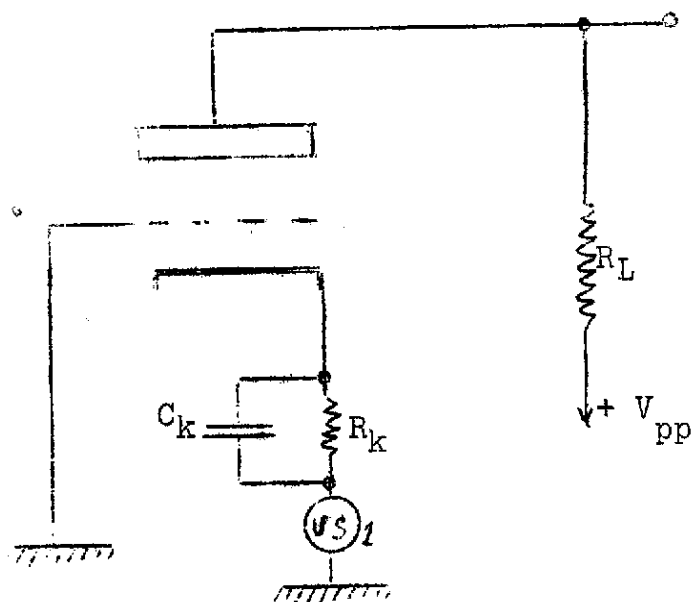
A resistência de saída será então:

$$R_0 = \frac{v_0}{i_0} = \frac{r_p \cdot R_k}{r_p + (1 + \mu) \cdot R_k}$$

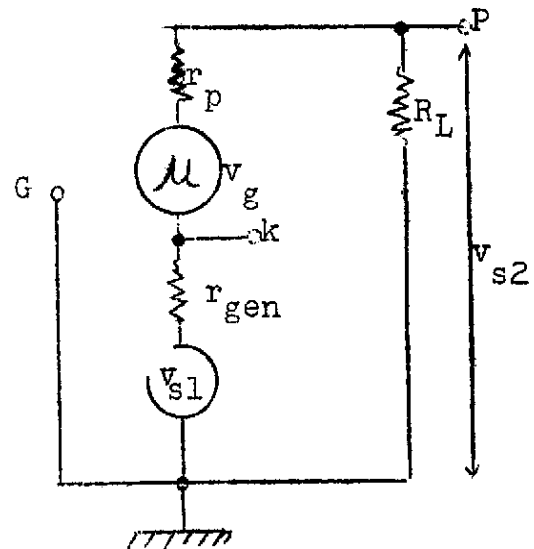
$$R_0 = \frac{r_p \cdot R_k}{r_p + R_k \cdot (\mu + 1)}$$

3a) Amplificador de grade comum:

No amplificador de "grade comum" a grade é ligada diretamente à massa. Geralmente esses amplificadores, são utilizados com circuitos sintonizados, pois eles apresentam baixa impedância de entrada e alta impedância de saída.



Nessa configuração o sinal a ser amplificado é aplicado no catodo da válvula. Para explicar o funcionamento poderemos representar o circuito equivalente como um gerador de tensão.



A malha de placa será:

$$R_L \cdot i_p + r_p i_p - \mu v_g + r_{gen} i_p + v_{s1} = 0$$

A malha de grade:

$$v_g + r_{gen} \cdot i_p + v_{s1} = 0$$

Dessas equações podemos tirar o valor de i_p :

$$i_p = \frac{- (\mu + 1) v_{s1}}{R_L + r_p + (\mu + 1) r_{gen}}$$

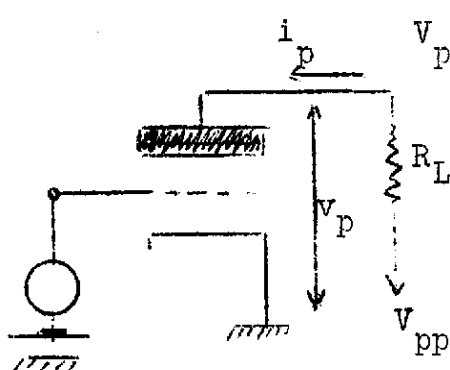
Como a tensão do sinal de saída $v_{s2} = - R_L i_p$ o ganho de tensão será:

$$A_v = \frac{v_{s2}}{v_{s1}}$$

$$A_v = \frac{R_L (\mu + 1)}{R_L + r_p + r_{gen} (\mu + 1)}$$

Limitações na operação dos triodos:

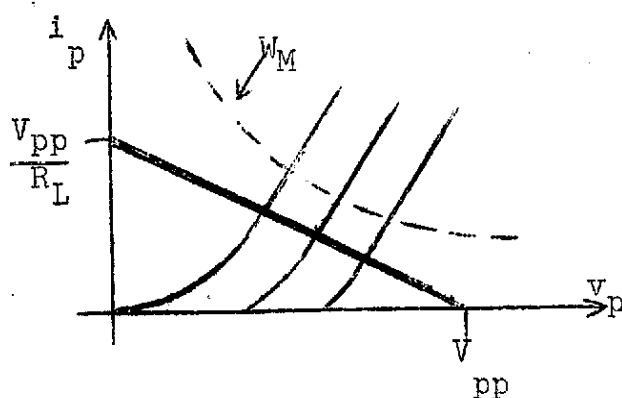
Como qualquer dispositivo elétrico ou eletrônico as válvulas de vácuo não podem ser operadas em condições quaisquer. Para que elas proporcionem longa vida útil certas restrições devem ser observadas. Em primeiro lugar, a potência dissipada pela válvula deverá ser inferior a um certo limite máximo especificado pelo fabricante. Se considerarmos por exemplo a configuração catodo comum, aplicando a lei de Kirchhoff, a malha de placa:



Multiplicando cada membro da equação por i_p :

$$V_{pp} \cdot i_p = v_p \cdot i_p + R_L i_p^2$$

Estamos vendo que no primeiro termo teremos a potência instantânea fornecida ao circuito pela fonte de alimentação; Esta mesma potência vai se decompôr em duas partes, sendo $v_p i_p$ dissipada na resistência interna da válvula e $R_L i_p^2$ na resistência de carga. A potência $V_p i_p$ será dissipada na placa da válvula submetida ao bombardeio dos elétrons e conseqüentemente a mesma sofrerá um aumento de temperatura. Para que esta temperatura não alcance valores exagerados, precisará que a potência média dissipada seja inferior a máxima dissipação que esta válvula pode suportar, sendo:



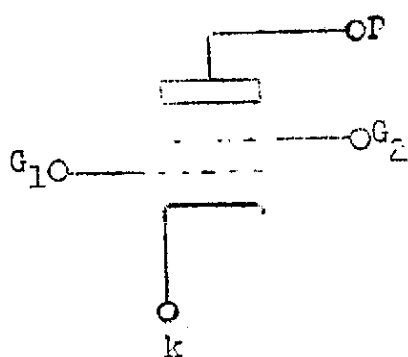
$$V_{pm} \cdot I_{pm} \leq W_M$$

I) Funcionamento:

O tetrodo de vácuo é uma válvula comportando quatro eletrodos, sendo um catodo, duas grades e uma placa. A primeira grade se chamará grade de controle, sendo a mais perto do catodo. A outra grade se chamará de grade de blindagem e ficará situada entre a grade de controle e a placa.

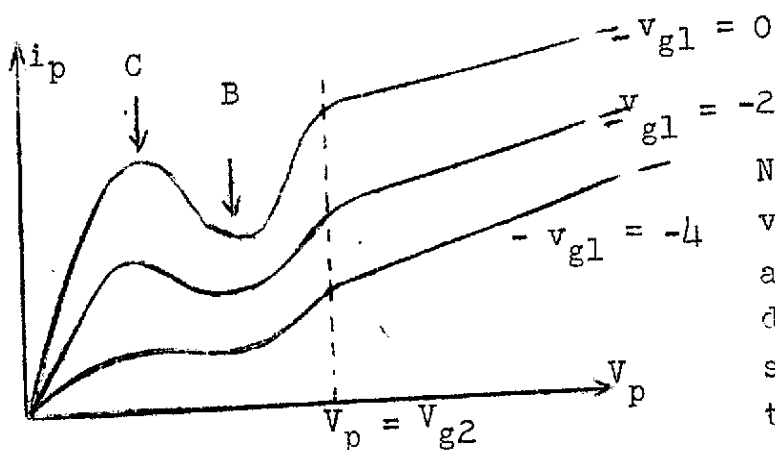
Como no triodo, a grade de controle será polarizada negativamente, mas a grade de blindagem será elevada a um determinado potencial positivo em relação ao catodo. Consequentemente circulará uma corrente na grade de blindagem. Estamos assim vendo que no tetrodo a corrente de placa será função de quatro variáveis sendo:

$$i_p = F(v_p, v_{g1}, v_{g2})$$



A interposição da grade de blindagem reduz a capacidade C_{gp} pela blindagem eletrostática que ela apresenta. Como a grade G_2 é positiva em relação a K, de maneira a acelerar os elétrons, uma fração dos mesmos serão captados e haverá uma certa corrente em G_2 . Os de-

mais prosseguiram em direção a placa, constituindo a corrente anódica.



Na região da característica em que $v_p > v_{g2}$, pelo efeito de blindagem, a corrente de placa depende pouco do potencial de placa e as curvas são quase horizontais. Quando o potencial de placa for vizinho do potencial de v_{g2} , a característica será muito influenciada, pela emissão secundária de placa, isso pois

se v_p for ligeiramente menor do que v_{g2} , o campo elétrico entre P e G_2 é pequeno e os elétrons são captados, pela grade de blindagem, causando diminuição da corrente de placa. O potencial de placa diminuindo ainda mais passará a formar um forte campo retarda -

dor e os elétrons atingirão a placa com uma velocidade cada vez menor, o que diminuirá a emissão secundária.

A partir de um certo ponto B o efeito anterior é superado, a corrente i_{g2} diminui e i_p aumenta novamente bem que v_p diminui. Chegaremos a uma inclinação negativa da curva; Chamaremos esta (B-C) de efeito "Dinatron".

Pela lei de Child-Langmuir, podemos exprimir a corrente de placa:

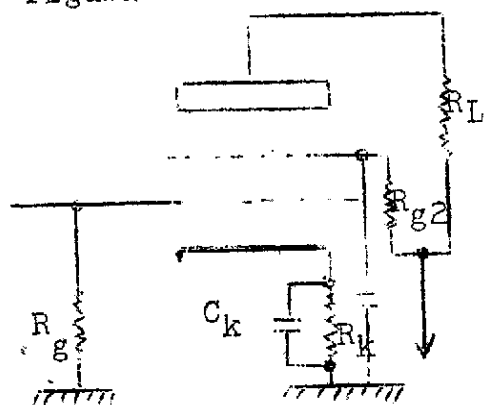
$$i_p = k (v_{g1} + \frac{v_p}{\mu_1} + \frac{v_{g2}}{\mu_2})^{3/2} \quad \text{para } v_p > v_{g2}$$

Com $\mu_1 = \frac{\Delta v_p}{\Delta v_{g1}}$

$$\mu_2 = \frac{\Delta v_p}{\Delta v_{g2}}$$

II) Ligações do tetrodo:

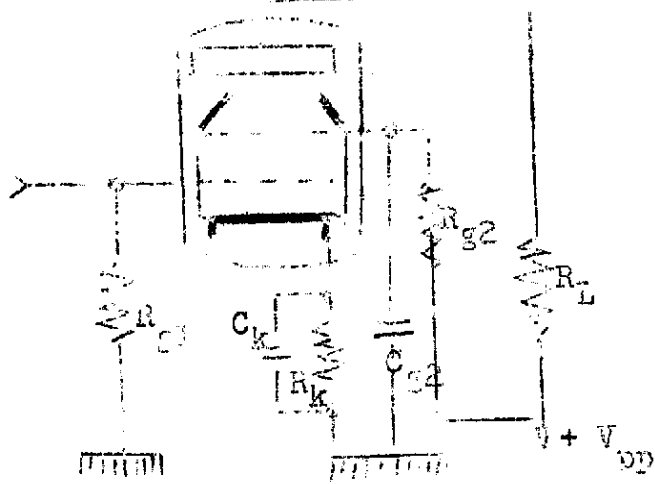
Na prática os tetrodos serão pouco utilizados, devido a forte emissão secundária e ao efeito dinatron, capaz de fazer oscilar a válvula. A ligação prática poderá ser conforme à figura do lado. Na grade de blindagem, colocaremos uma resistência



cia R_{g2} de maneira que a tensão $v_{g2} = v_p$. A polarização poderá ser feita através de uma resistência de catodo. Geralmente o coeficiente de amplificação 200 1500.

III) Tetrodo de feixe dirigido:

Para suprimir o efeito dinatron, coloca-se dois eletrodos entre G_2 e P. Esses dois eletrodos sendo ligados ao catodo. Esses eletrodos vão então, repelir os elétrons tendo ricocheta sobre a placa e impedir a formação de uma carga especial ao seu redor. A característica do tetrodo a feixe dirigido, tornar-se-á desta maneira praticamente plana e a ligação da válvula será a mesma do que do tetrodo simples.



O condensador C_{g2} tem para finalidade desviar para a massa, as variações da corrente i_{g2} e assim - manter seu potencial constante. Para o cálculo da resistência de polarização R_k deveremos levar em conta a corrente I_{g2} , pois:

$$I_k = I_p + I_{g2}$$

$$-V_g = V_k = R_k (I_p + I_{g2})$$

$$\Rightarrow R_k = \frac{V_k}{(I_p + I_{g2})}$$

Sabemos também que em todos os casos:

$$R_L \cdot i_p + r_p \cdot i_p - \mu v_g = 0$$

$$\Rightarrow \mu v_g = R_L \cdot i_p + r_p \cdot i_p$$

$$\Rightarrow \mu v_g = i_p (R_L + r_p)$$

Consequentemente:

$$i_p = \frac{\mu v_g}{R_L + r_p}$$

$$* v_p = -R_L \cdot i_p = -\mu \cdot v_g \cdot \frac{R_L}{R_L + r_p}$$

Aplicando ao tetrodo:

$$i_p = \frac{\mu v_{g1}}{R_L + r_p} \quad \text{Como } r_p \gg R_L \text{ e que } \frac{\mu}{r_p} = g_m$$

$$i_p \approx g_m \cdot v_{g1}$$

$$i_p \approx g_m \cdot v_{g1}$$

A tensão alternada recolhida na placa será então:

$$v_p = -R_L \cdot i_p \approx -g_m v_{g1} \cdot R_L$$

O sinal menos indica que o sinal de placa é em oposição de fase - com v_{g1} .

$$v_p \approx -R_L \cdot v_{g1} \cdot g_m$$

O ganho em tensão do circuito será :

$$A_v = \frac{v_{s2}}{v_{s1}} \approx \frac{-R_L \cdot v_{g1} \cdot g_m}{v_{g1}}$$

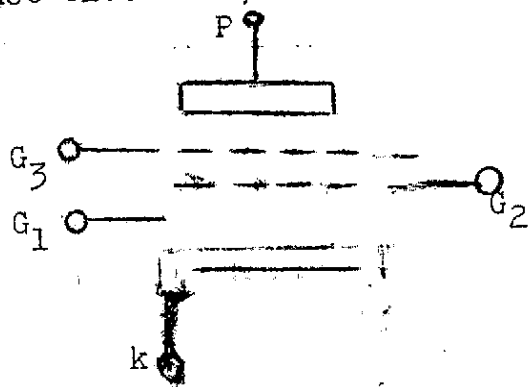
$$A_v \approx -R_L g_m \text{ mas como, } g_m = \frac{\mu}{R_L + r_p}$$

$$A_v = - \frac{\mu \cdot R_L}{R_L + r_p}$$

PENTODO

I) Funcionamento:

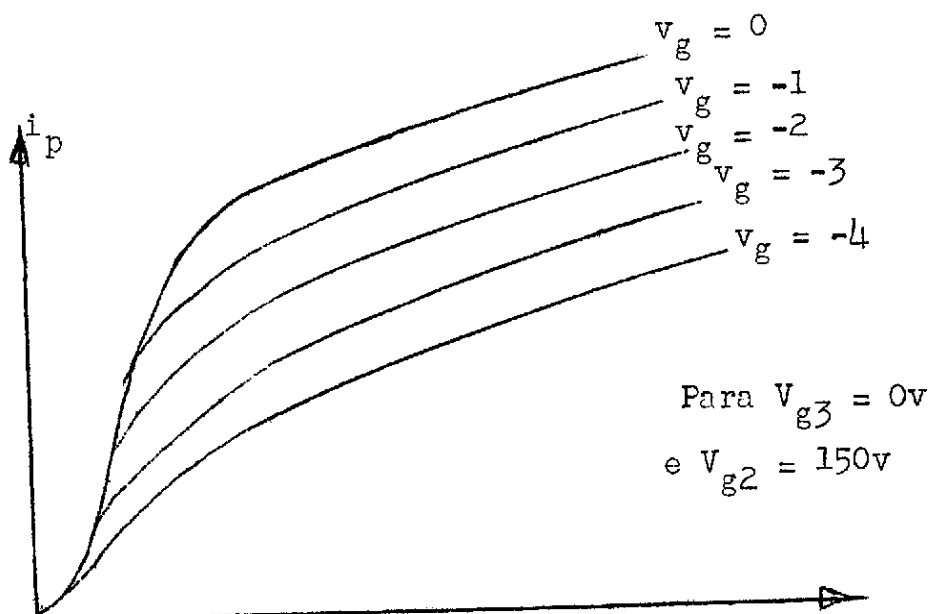
Os pentodos de vácuo são dispositivos de controle com cinco eletrodos, sendo um catodo, tres grades e uma placa.



A grade G_1 é a grade de controle, a grade G_2 é a grade de blindagem e a grade G_3 sendo a grade supressora. Geralmente esta terceira grade é ligada ao catodo ou a terra.

Esta ligação pode ser efetuada externamente, mas certa válvula já vem com a ligação conetada internamente. A grade supressora elimina os efeitos da emissão secundária em consequência do seu potencial igual ou vizinho do potencial do catodo. A grade de blindagem G_2 será elevado a um potencial positivo. Se colocarmos na placa um potencial $V_p \gg V_{g2}$ a corrente de placa variará pouco com a tensão de placa devido ao efeito duplo da blindagem das grades G_2 e G_3 . Se o potencial de placa $V_p < V_{g2}$, teremos um campo retardador entre G_2 e P e alguns electrões fluirão através da grade de blindagem G_2 . Esses electrões de baixa velocidade vão constituir uma carga espacial deprimindo o potencial na vizinhança, da grade supressora que poderá chegar a aumentá-lo. Geralmente os fabricantes fornecem uma família de características para vários valores de V_{g2} .

II) Características:



Como não tem emissão secundária a curva V_p , torna-se muito linear.

A corrente de placa i_p será função de quatro variáveis sendo:

$i_p = F(v_{g1}, v_{g2}, v_{g3}, v_p)$ e poderá ser expressida pela lei de Child-Langmuir;

$$i_p = K \left(v_{g1}, \frac{v_{g2}}{\sqrt{\mu_2}} + \frac{v_p}{\sqrt{\mu_1}} \right)^{\frac{3}{2}}$$

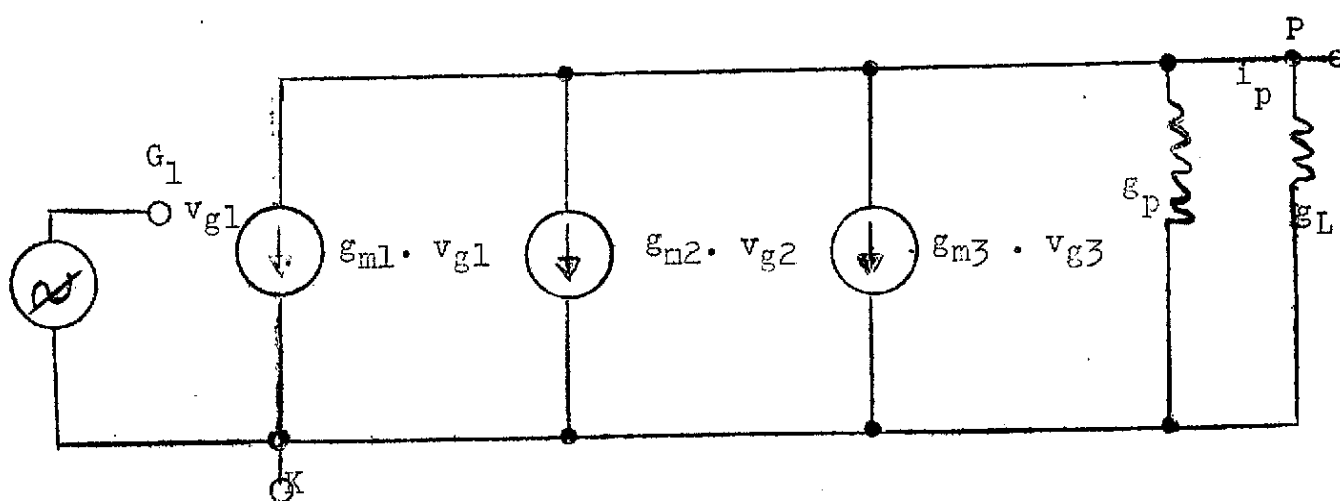
isso sendo válido para $v_p > v_{g2}$ e $v_{g3} = 0$, pois está ao potencial do catodo.

A relação pode ser então escrita.

$$\left(\frac{i_p}{k} \right)^{\frac{2}{3}} = v_{g1} + \frac{v_{g2}}{\mu_2} + \frac{v_p}{\mu_1}$$

2a) Circuito equivalente:

Podemos representar o circuito equivalente com geradores de corrente g_{m1} , v_{g1} ; g_{m2} , v_{g2} ; g_{m3} , v_{g3} ;



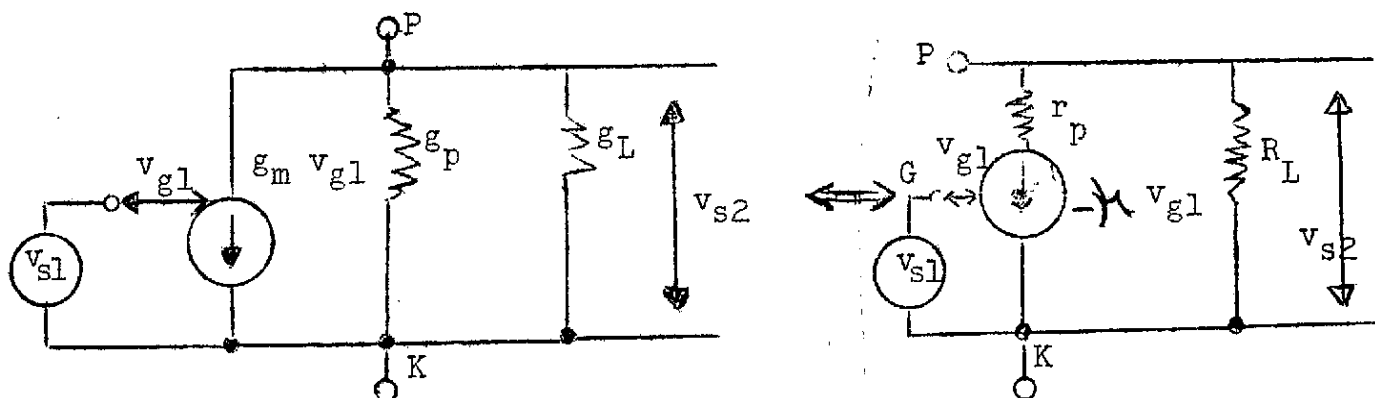
A corrente i_p será então:

$$-i_p + g_{m1} v_{g1} + g_{m2} v_{g2} + g_{m3} v_{g3} = 0$$

$$i_p = g_{m1} v_{g1} + g_{m2} v_{g2} + g_{m3} v_{g3}$$

A grade de controle G_1 é polarizada negativamente em relação ao catodo e não terá corrente de grade.

A tensão geralmente aplicada na grade supressora é zero e a tensão na grade de blindagem positiva e constante; Consequentemente v_{g2} e v_{g3} são constantes, pois não são variáveis e não haverá ganho de corrente nesses dois geradores. O circuito equivalente pode então ser o mesmo do triodo e utilizaremos as mesmas formulas de ganho, embora os parâmetros tenham valores diferentes.



O ganho em tensão será expressido por:

$$A_V = - \frac{R_L}{r_p + R_L}$$

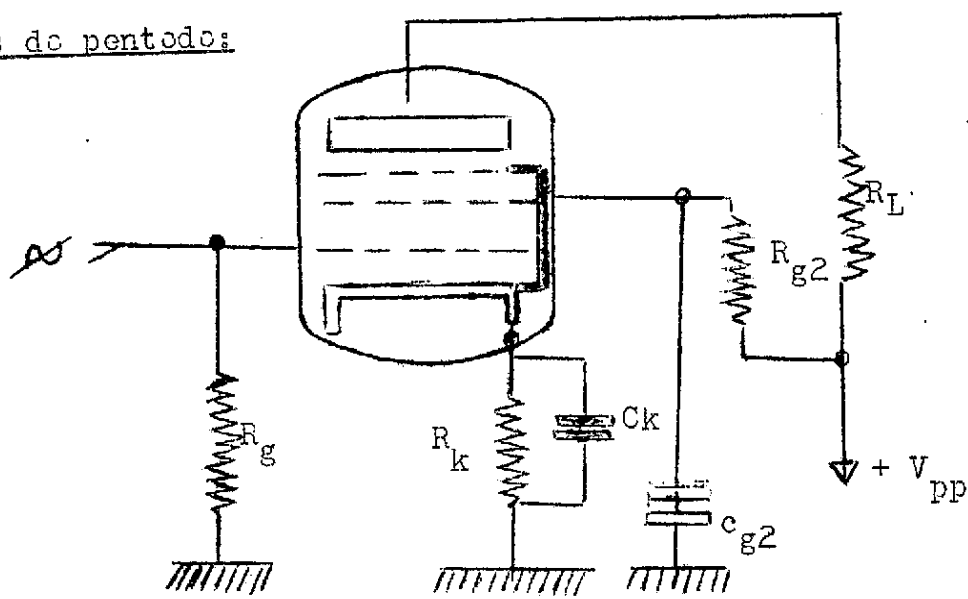
* A corrente de placa variável:

$$i_p = \frac{v_g}{R_L + r_p}$$

* A tensão de placa variável:

$$v_p = - i_p \cdot R_L = - \frac{v_g R_L}{R_L + r_p}$$

3º) Ligações do pentodo:



Como no caso do tetrodo, no cálculo da resistência de catodo R_k , - não se deve esquecer que a corrente I_k é formada por I_p e I_{g2} .

$$I_k = I_p + I_{g2}$$

Consequentemente:

$$- V_{g0} = V_k$$

$$R_k = \frac{V_k}{I_k} = \frac{V_k}{I_p + I_{g2}}$$

A reatância do condensador de desacoplamento deverá ser:

$$X_c \leq \frac{R_k}{10} \quad \text{Como } X_c = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{6.28 \cdot F}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{C \cdot 2\pi \cdot F} \leq \frac{R_k}{10} \Rightarrow \frac{10}{R_k \cdot 2\pi \cdot F} \leq C$$

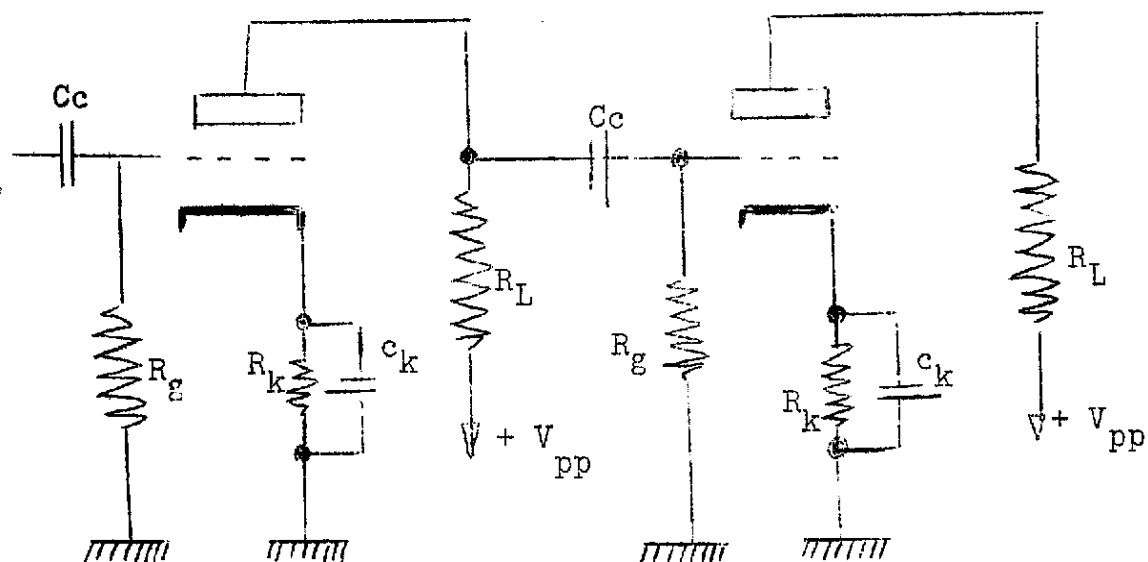
$$C \geq \frac{1.6}{R_k \cdot F}$$

Amplificadores Multiestágios:

Muitas vezes um único circuito não proporciona a amplificação desejada. Assim precisaremos colocar vários estágios, trazendo cada seu próprio ganho. Esses estágios poderão ser ligados - de vários modos entre si, seja por circuito R_c , transformador, indutância, capacitância.

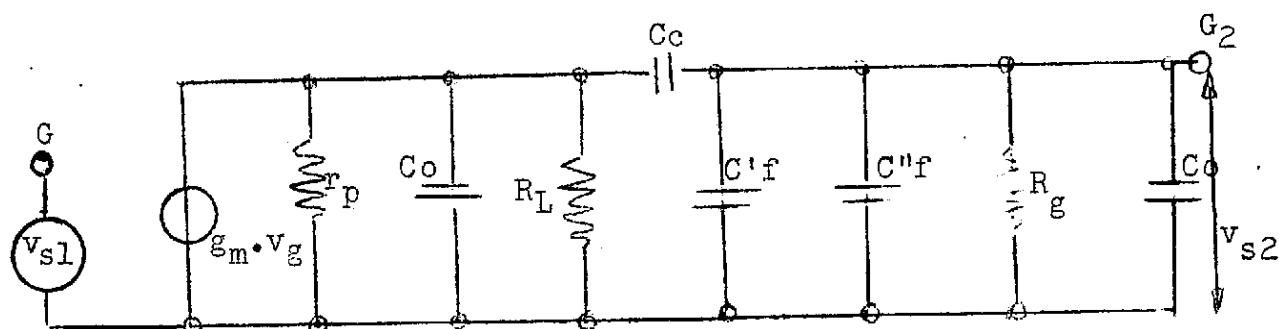
I) Amplificadores de acoplamento R.C.

Nesse tipo de amplificador o acoplamento entre os vários estágios é feito essencialmente por circuito RC.



O condensador C_c bloqueará a componente contínua V_{po} deixando passar unicamente a variação v_p . Contudo esse amplificador funcionando numa faixa de frequências relativamente grande precisaremos de estudar o ganho nos casos extremos e intermediários.

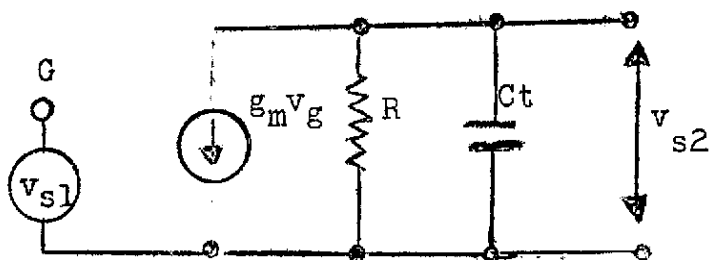
Podemos resumir o circuito acima por um circuito equivalente sendo:



onde C_o é a capacitância de saída e de entrada das válvulas, C_f a capacitância da fiação, C_c , a capacitância de acoplamento.

19) Frequências altas:

Nas frequências altas a capacitância de saída e de entrada das válvulas será relativamente elevada, mas em compensação poderemos desprezar a reatância do condensador de acoplamento, que se tornará muito pequena. Podemos então definir um circuito equivalente comportando os valores, interferindo no ganho.



com R sendo:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{r_p} + \frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_g}}$$

e C sendo:

$$C_t = C_o + C_f' + C_f'' + C_o.$$

A frequência de corte superior, seja a frequência em que a amplificação A_v cai para 0,707 de A_v ou seja 3dB será:

$$\left| A_v(j\omega) \right| = \frac{A_v}{\sqrt{2}} \approx \frac{g_m R}{\sqrt{2}}$$

Pela tabela sabemos que:

$$A_{vH} = A_v(j\omega) = -g_m R \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_2}}$$

$$\text{com } \omega_2 = \frac{1}{RC_t}$$

Para satisfazer a equação precisa que:

$$1 + \frac{j\omega}{\omega_2} = \sqrt{2} \Rightarrow$$

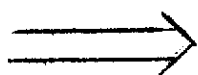
$$\sqrt{1^2 + \frac{j^2 \omega^2}{\omega_2^2}}$$

$$\text{mas } j^2 = -1$$

$$\sqrt{1+1}$$

$$\omega^2 = \omega_2^2 \Rightarrow \omega = \omega_2$$

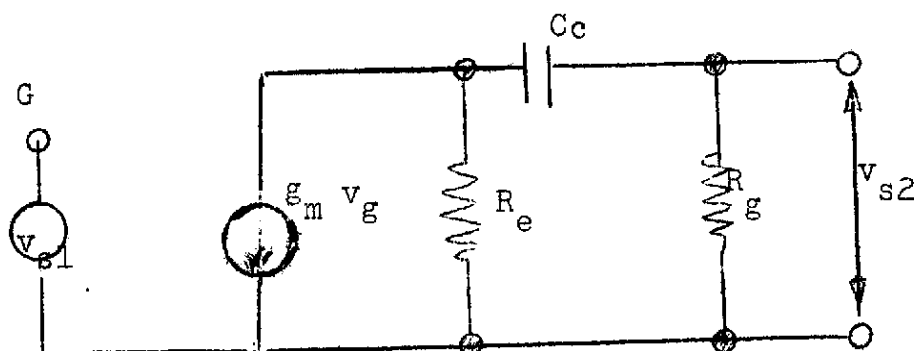
$$\text{como } \omega_2 = \frac{1}{RC_t} \Rightarrow \omega = \frac{1}{RC_t}$$



$$F_H = \frac{1}{2 \pi RC_t}$$

2º) Frequências baixas:

Nas frequências baixas poderemos desprezar as capacitâncias de saída e de entrada das válvulas, mas o condensador de acoplamento apresentará uma reatância relativamente alta. Poderemos simplificar o circuito para o equivalente sendo:



$$\text{com } R_e = \frac{r_p \cdot R_L}{r_p + R_L}$$

A frequência de corte inferior ou sendo a frequência mais baixa pela qual o ganho ainda será igual a 0,707 de A_v . Será:

$$\left| A_v(j\omega) \right| = \frac{A_v}{\sqrt{2}} = \frac{-g_m R}{\sqrt{2}}$$

Pela tabela sabemos que:

$$A(j\omega) = -g_m R \frac{j\omega}{j\omega + \omega_1} = -g_m R \frac{1}{1 + \frac{\omega_1}{j\omega}}$$

$$\text{com } w_1 = \frac{1}{(R_1 + R_g) C_c}$$

$$A(jw) = A_{vL} = - \frac{g_m R}{1 + \frac{1}{(R_1 + R_g) C_c} jw}$$

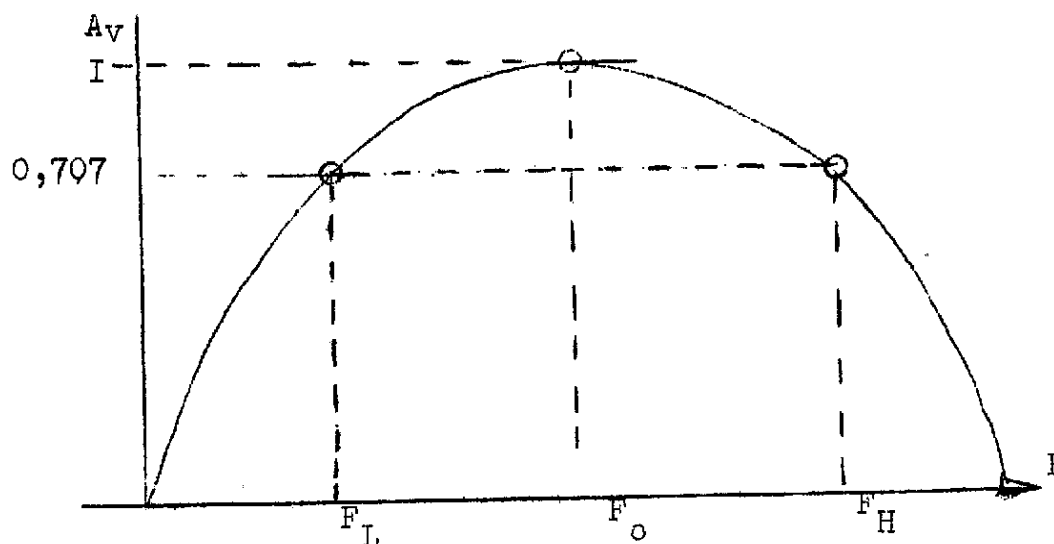
Para satisfazer a equação precisa que:

$$\sqrt{2} = \sqrt{1^2 + \left[\frac{1}{(R_1 + R_g) C_c} jw \right]^2}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{(R_1 + R_g) C_c} = w$$

$$\Rightarrow \boxed{F_L = \frac{1}{2\pi (R_1 + R_g) C_c}}$$

A curva de ganho em função da frequência será então:



II) Ganho global do amplificador:

12) O Bel e o Decibel

É muito mais interessante de exprimir o ganho dos amplificadores em termos relativos usando unidades logarítmicas. Podemos definir então o bel como o logaritmo decimal da relação de duas potências.

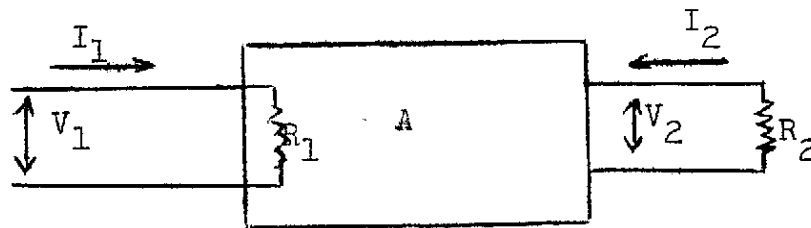
$$G \text{ em B} = \text{Log}_{10} \frac{P_2}{P_1}$$

Teremos assim o nível de potência em Bel de P_2 em relação a P_1 . Como o Bel é uma unidade muito grande vamos lhe preferir o decibel que é a sua décima parte.

$$G \text{ em dB} = 10 \text{ Log}_{10} \frac{P_2}{P_1}$$

Poderemos dizer assim que o ganho em potência do amplificador em dB é positivo, negativo ou nulo conforme a razão da potência $\frac{P_2}{P_1}$ seja

> 1 , < 1 , $= 1$.



Muitas vezes a potência não é medida, mas sim o valor máximo da tensão. Sabemos que a potência é ligada à relação :

$$P_1 = \frac{V_1^2}{R_1} \quad \text{e} \quad P_2 = \frac{V_2^2}{R_2}$$

Substituindo na equação teremos :

$$G \text{ dB} = 10 \text{ Log} \frac{\frac{V_2^2}{R_2}}{\frac{V_1^2}{R_1}} = 10 \text{ log} \frac{V_2^2 \cdot R_1}{V_1^2 \cdot R_2}$$

Considerando $R_1 = R_2$

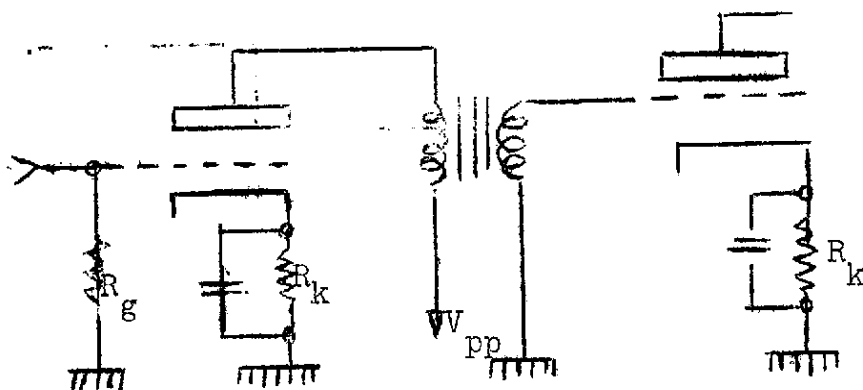
$$G \text{ dB} = 10 \log \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2$$

$$G \text{ dB} = 20 \log \left(\frac{I_2}{I_1} \right)$$

$$G \text{ dB} = 20 \log A_I$$

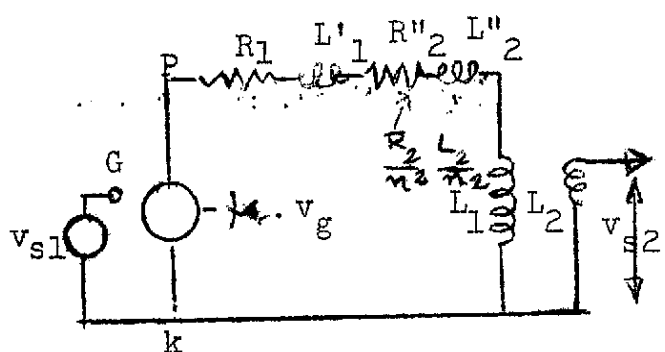
III) Acoplamento por transformador:

Nesse tipo de amplificadores o acoplamento é feito através de um transformador servindo de carga e fazendo a transferência de energia entre placa e grade da válvula seguinte, ou a qualquer outro elemento dissipador de energia. A vantagem oferecida pelo acoplamento por transformador é que o secundário do mesmo pode conter mais espiras do que o primário.

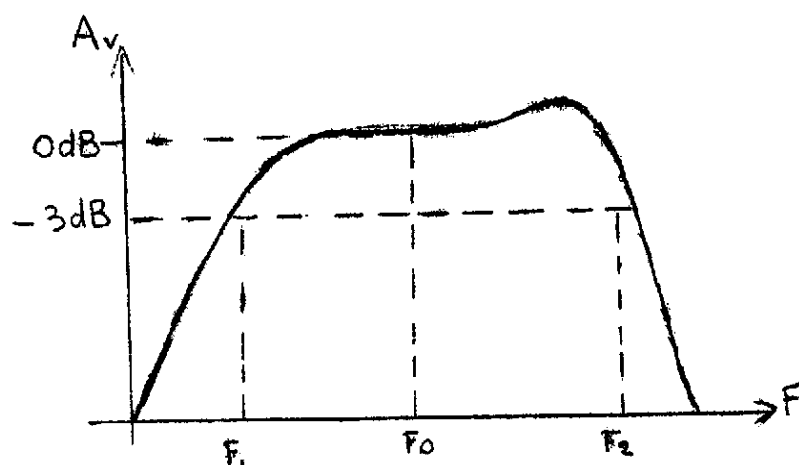


Consequentemente a tensão V_2 secundária será mais elevada do que N_1

primária e beneficiaremos do ganho trazido pelo transformador. Em contraparte as causas que levam o acoplamento a transformador não ser mais amplamente utilizado, é que a res-
posta em frequência do transformador é relativamente pobre e que a impedância apresentada pelo mesmo varia com a frequência.



De fato podemos representar o circuito pelo seu modelo equivalente transferindo o circuito secundário no primário. Teremos assim as duas resistências dos enrolamentos em série com as indutâncias de dispersão L'_1 e L''_2 . A resposta será então devida aos elementos reativos:



IV) Acoplamento à carga por transformador:

1º) Circuito simples

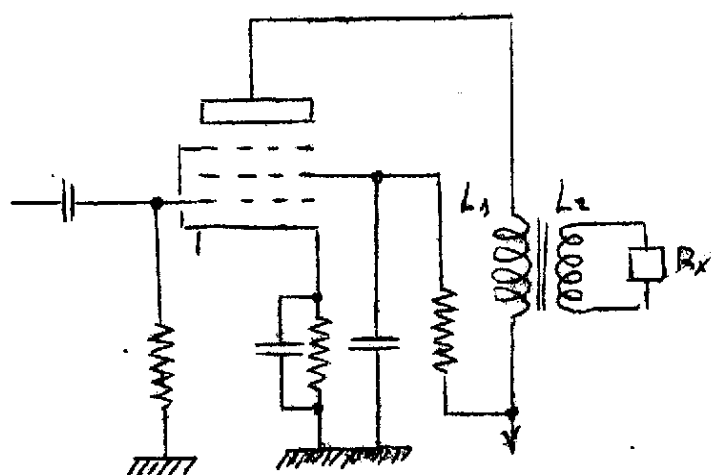
O acoplamento à transformador é geralmente utilizado para acoplar o amplificador de saída à carga. Para simplificar o nosso estudo consideraremos o transformador como perfeito, isto é, sem indutância de dispersão nem resistência do enrolamento uma vez que esta última é pequena frente a X_L e r_p .

Se o transformador é considerado ideal podemos escrever que:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = n$$

Consequentemente a potência dissipada na resistência de carga R_X será:

$$P_2 = V_2 \cdot I_2 = V_1 \cdot I_1$$



$$n^2 = \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{I_1} \cdot \frac{I_2}{V_2}$$

$$\text{mas } \frac{V_1}{I_1} = Z_1$$

$$\text{e } \frac{I_2}{V_2} = Y_2$$

$$Z_2 = \frac{1}{Y_2}$$

Consequentemente:

$$n^2 = \frac{Z_1}{Z_2}$$

$$n = \frac{Z_1}{Z_2}$$

$$\boxed{Z_1 = Z_2 n^2}$$

A resistência refletida no primário será:

$$R'_x = \frac{V_1}{I_1}$$

$$\text{mas } \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$V_1 = \frac{V_2 I_2}{I_1}$$

$$R'_x = \frac{V_1}{I_1} = \frac{\frac{V_2 I_2}{I_1}}{I_1} \cdot \frac{I_2}{I_2}$$

$$\frac{I_2 V_2}{I_1^2 I_2} = n^2 \cdot R_x$$

$$\boxed{R'_x = n^2 R_x}$$

A potência de entrada no primário do transformador será então igual a potência dissipada na carga visto que admitimos o transformador-perfeito seja:

$$P_p = V_p I_p = \frac{V_{pm}}{2} \cdot \frac{I_{pm}}{2} = \frac{V_{pm} I_{pm}}{4}$$

$$\text{mas } V_{pm} = \frac{V_{pmax} - V_{pmm}}{2}$$

$$\text{e } I_{pm} = \frac{I_{pmax} - I_{pmm}}{2}$$

$$P_p = \frac{(V_{pmax} - V_{pmm})(I_{pmax} - I_{pmm})}{8}$$

O rendimento do circuito será:

$$\eta = \frac{\text{Potência em CA}}{\text{Potência em CC}} = \frac{P}{P_o}$$

Considerando o amplificador funcionando nas condições ótimas:

$$V_{pm} = V_{pp} \quad \text{quando } V_{pmm} = 0 \quad \text{e}$$

$$I_{pm} = I_{po} \quad \text{quando } I_{pmm} = 0$$

A potência CA dissipada na carga será então:

$$P_p = \frac{V_{pp} \cdot I_{po}}{2}$$

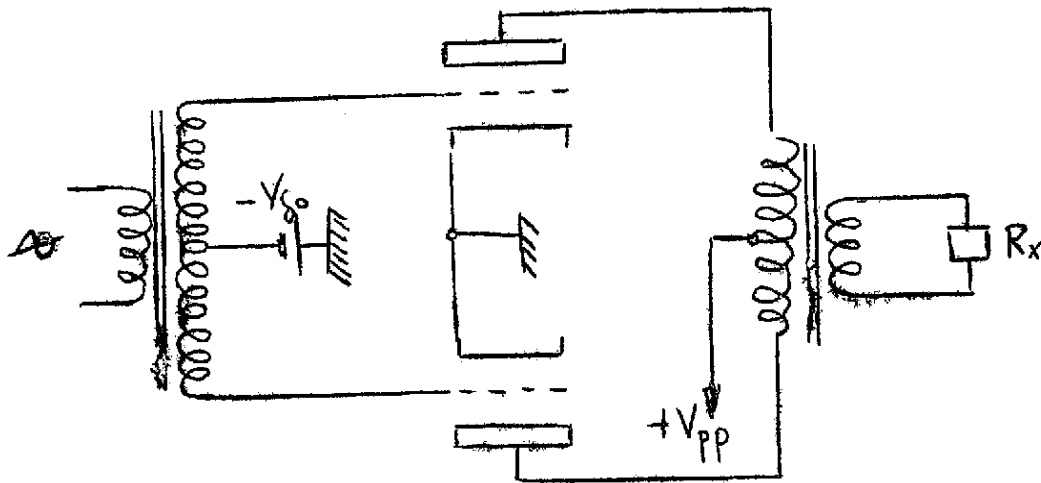
O rendimento teórico máximo do circuito poderá ser assim:

$$\eta = \frac{P_p}{P_o} = \frac{\frac{V_{pp} \cdot I_{po}}{2}}{V_{pp} \cdot I_{po}} = 0,5$$

2º) Circuito Push-Pull ou Contrafase:

Sabemos que os amplificadores classe B operam polarizados no corte, de maneira que existe corrente de placa somente quando a tensão negativa torna-se menos negativa do que o valor de corte. Consequentemente o sinal deverá excursionar na direção positiva e assim só o meio ciclo positiva colocará a válvula em condução. Se colocarmos duas válvulas ligadas a um mesmo transformador com derivação central e que aplicarmos a cada uma das válvulas sucessivamente o meio ciclo positivo de 0 a π na primeira e que por um inversor qualquer inverter-mos o meio ciclo negativo do π a 2π ,

para um valor positivo, a segunda válvula nos restituirá este sinal. A componente CA do sinal será então integralmente restituída e reinvertida pelo transformador colocado na placa. Assim na carga o sinal recobrirá sua forma original.



Sabemos que o fator de transformação $n = \frac{N_1}{N_2}$ mas cada válvula-

é ligada em um meio enrolamento seja: $\frac{N_1}{2}$

A relação entre o primário e o secundário será então:

$$\frac{\frac{N_1}{2}}{N_2} = \frac{n}{2}. \text{ Como sabemos que:}$$

$Z_1 = n^2 Z_2$ a impedância de carga da válvula V_1 será:

$$Z_1' = \left(\frac{n}{2}\right)^2 Z_2 = \frac{n^2 Z_2}{4} = \frac{Z_1}{4}$$

$$Z_1 = 4 Z_1'$$

Quando a componente CA da corrente de placa passa pelo valor máximo a potência de saída CA será:

$$P_p = V_p I_p =$$

$$P_p = \frac{V_{pm} \cdot I_{pm}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} = \frac{V_{pm} \cdot I_{pm}}{2} \therefore I_p^2 \cdot Z'_1$$

$$P_p = \left(\frac{I_{pm}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot Z'_1 = \frac{I_{pm}^2}{2} \cdot Z'_1$$

$$\text{mas } Z'_1 = \frac{Z_1}{4}$$

$$P_p = \frac{I_{pm}^2 Z_1}{8}$$

O rendimento teórico máximo deste amplificador é de 79%. Para que haja transferência máxima de energia a impedância apresentada pelo transformador deve ser igual a resistência interna de válvula seja:

$$Z_1 = r_p$$

$$\text{como } Z'_1 = \frac{Z_1}{4} = r_p \implies Z_1 = 4r_p$$

AMPLIFICADORES SINTONIZADOS:

Os amplificadores sintonizados são amplificadores cuja carga de placa é um circuito LC sintonizado na frequência F_0 . Consequentemente, eles terão ganho uma faixa de frequência que se estende de ambos os lados da frequência da frequência central, chamada F_0 ou frequência de sintonia. O Circuito sintonizado poderá ser um circuito ressonante paralelo, em série ou a transformador ressonante. Geralmente esses amplificadores utilizam um pentodo e poderemos considerar isolados o circuito de entrada e de saída, pois a capacitância grade placa é pequena. Esses amplificadores serão utilizados em Radio-frequência.

Fator de Seletividade de um circuito:

Será definido como sendo a relação entre a corrente ou tensão no circuito a F_0 sobre a corrente na frequência F_1 sendo:

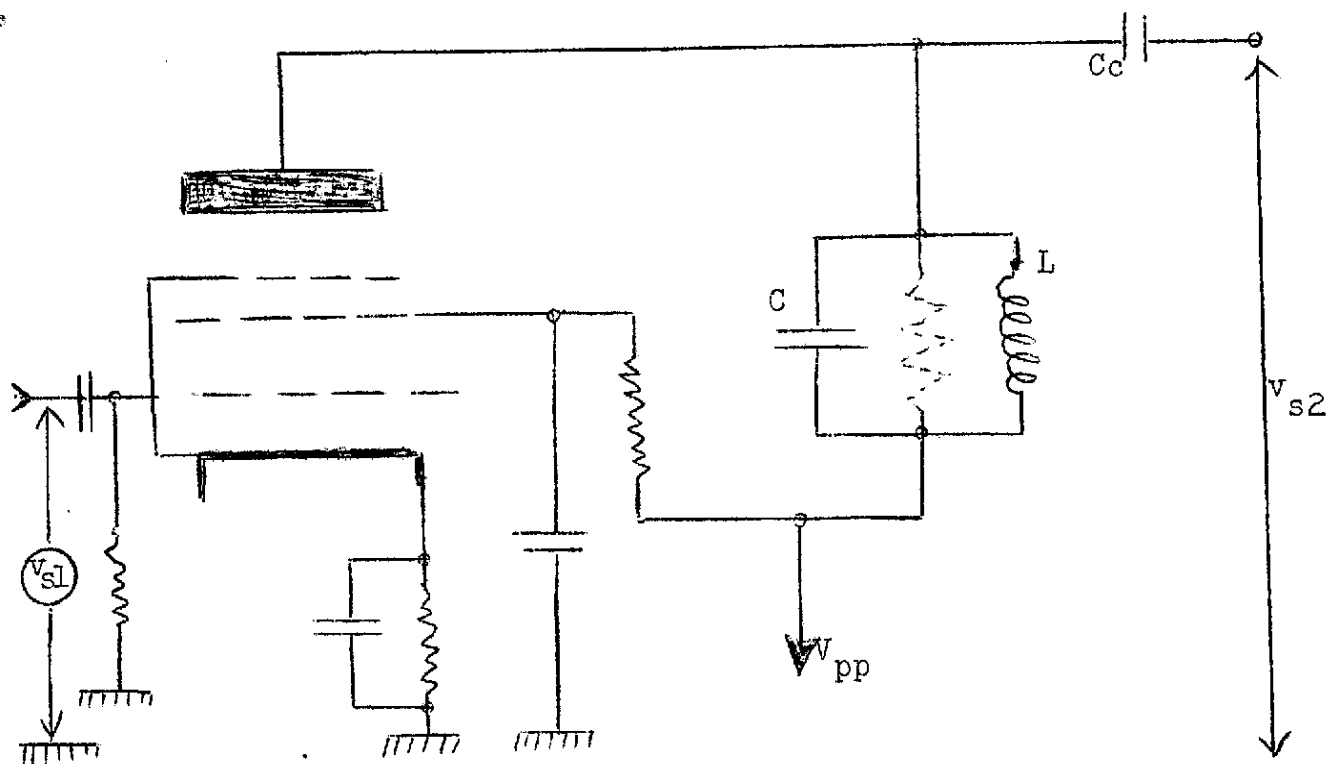
$$S = \frac{I_0}{I} = \frac{V_0}{V} \quad \text{para} \quad \frac{F_0}{F_0 \pm \Delta F}$$

$$S = \sqrt{1 + 4Q^2 \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^2}$$

$$\text{Com } Q = \frac{LW}{R}$$

I) Amplificador com circuito ressonante paralelo:

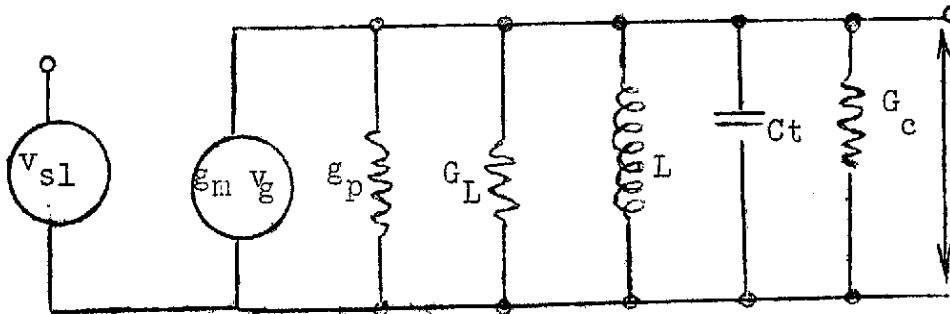
O amplificador será constituído por um pentodo tendo um circuito ressonante paralelo na placa.



Neste amplificador a capacitância total entre a placa do pentodo e a terra será C_t , essa capacitância incluindo, a capacitância da fiação.

Como o condensador de acoplamento C_c , apresenta uma reatância desprezível a frequência de funcionamento, poderemos desprezalo.

Para simplificar a explicação podemos representar o circuito equivalente:



Com $v_g = v_{s1}$.

Sabemos que: $v_{s2} = -g_m v_{s1} \cdot R_L \implies$

$$A_v = \frac{v_{s2}}{v_{s1}} = -g_m \cdot R_L$$

No amplificador a carga será a impedância Z_L e a expressão geral do ganho:

$$A_v = -g_m Z_L = \frac{-g_m}{Y_L}$$

$$A_v = \frac{-g_m}{G + JB}$$

$$\text{com } G = g_p + G_L + G_c \quad \text{e } B = J \cdot \left(\frac{1}{LW} - CW \right)$$

$$\implies A_v = \frac{-g_m}{(S_p + G_L + G_c) + J \cdot \left(\frac{1}{LW} - CW \right)}$$

Sabemos que o fator de mérito de uma bobina L é:

$$Q = \frac{LW}{R_L} = \frac{B_L}{G_L} = \frac{\frac{LW}{R^2 + L^2 W^2}}{\frac{R_L}{R^2 + L^2 W^2}}$$

Na frequência de ressonância F_0 , o Q_0 , geral do circuito pode ser definido em relação a B_L ou B_c , visto que $LW_0 = \frac{1}{CW_0}$ seja $W_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

$$Q_0 = \frac{B_{c0}}{G} = \frac{CW_0}{g_p + G_L + G_c}$$

A expressão do ganho será então:

$$A_v = \frac{-g_m}{(g_p + G_L + G_c) + j \cdot CW_0 \left(\frac{W}{W_0} - \frac{W_0}{W} \right)}$$

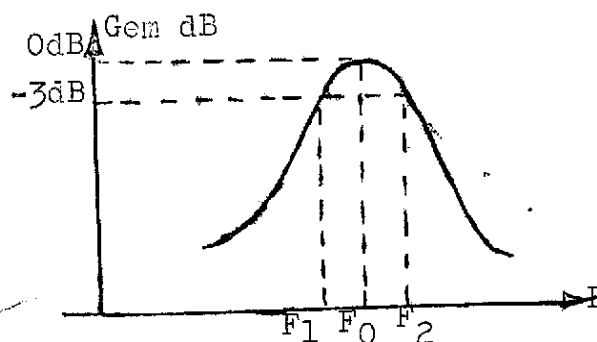
$$\Rightarrow A_v = \frac{-g_m}{C_0 W \cdot \left(\frac{1}{Q_0} - jF \right)}$$

$$\text{com } F = \left(\frac{W}{W_0} - \frac{W_0}{W} \right) \Rightarrow F = \frac{F}{F_0} - \frac{F_0}{F}$$

Na ressonância $W = W_0 \Rightarrow F = 0$ e o ganho será:

$$A_v = \frac{-g_m}{G \cdot CW_0 \left(\frac{1}{Q_0} \right)} = \frac{-g_m}{G} = \frac{-g_m}{g_p + G_L + G_c}$$

A curva do ganho em função da frequência sendo:

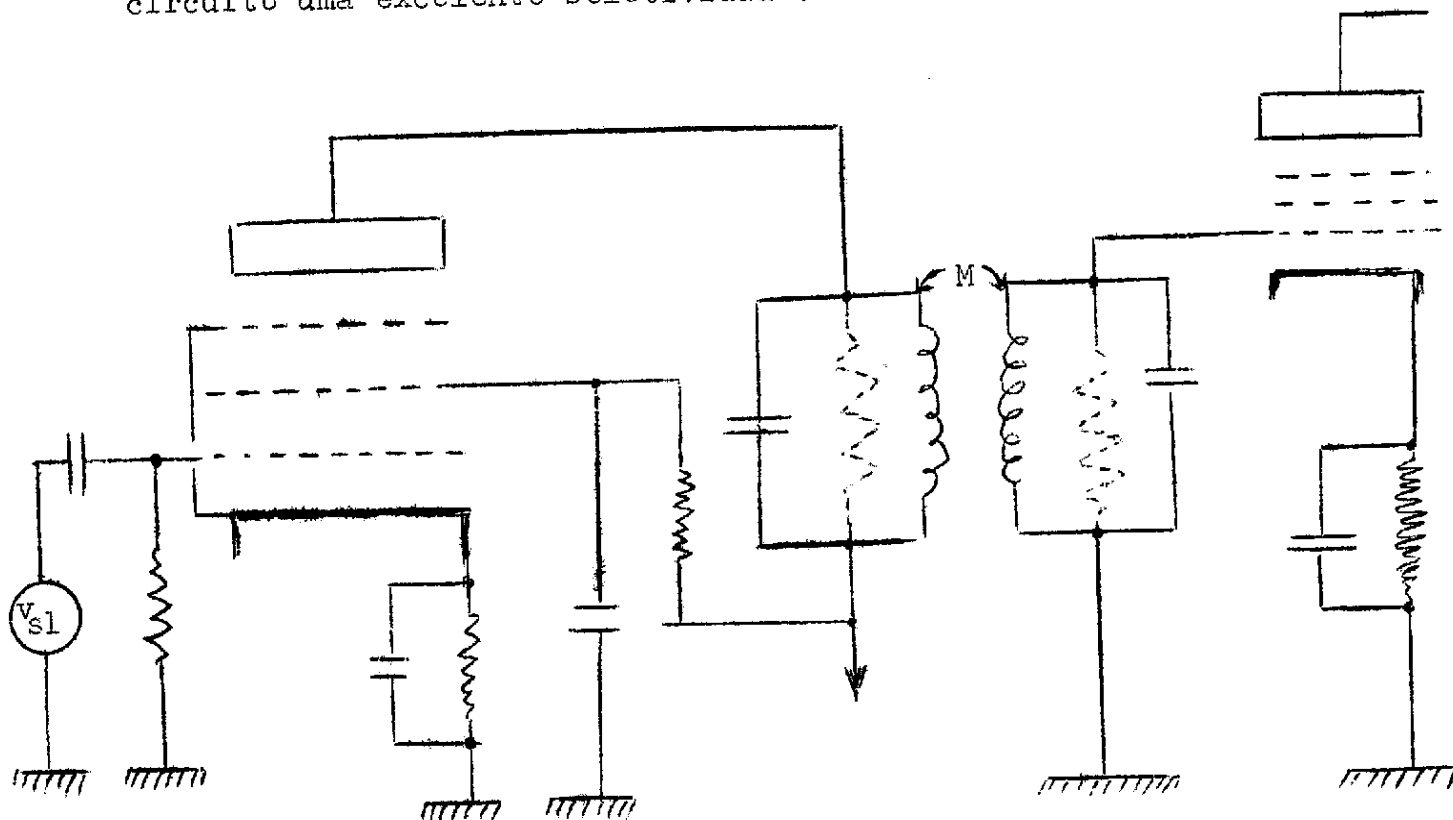


Podemos acrescentar também que maior será a resistência em paralelo sobre o circuito oscilante, mais aguda será a curva do ganho, pois melhor será o Q do circuito.

II) Amplificador de Sintonia Dupla:

São constituídos normalmente com um pentodo tendo como carga de placa um transformador com primário e secundário sintonizados. Pela mesma ocasião o transformador servirá de elemento, de acoplamento entre estágios.

Este sistema será muito utilizado por suas ótimas qualidades, sendo de ganho elevado e banda estreita, conferindo ao circuito uma excelente seletividade:



Quando o acoplamento do transformador é critico, o ganho do amplificador será dado pela relação:

$$A_v = \frac{-g_m \cdot W_0 \sqrt{L_1 L_2} Q_0}{2}$$

$$A_v = \frac{g_m W_0 \cdot Q_0 \cdot M}{2}$$

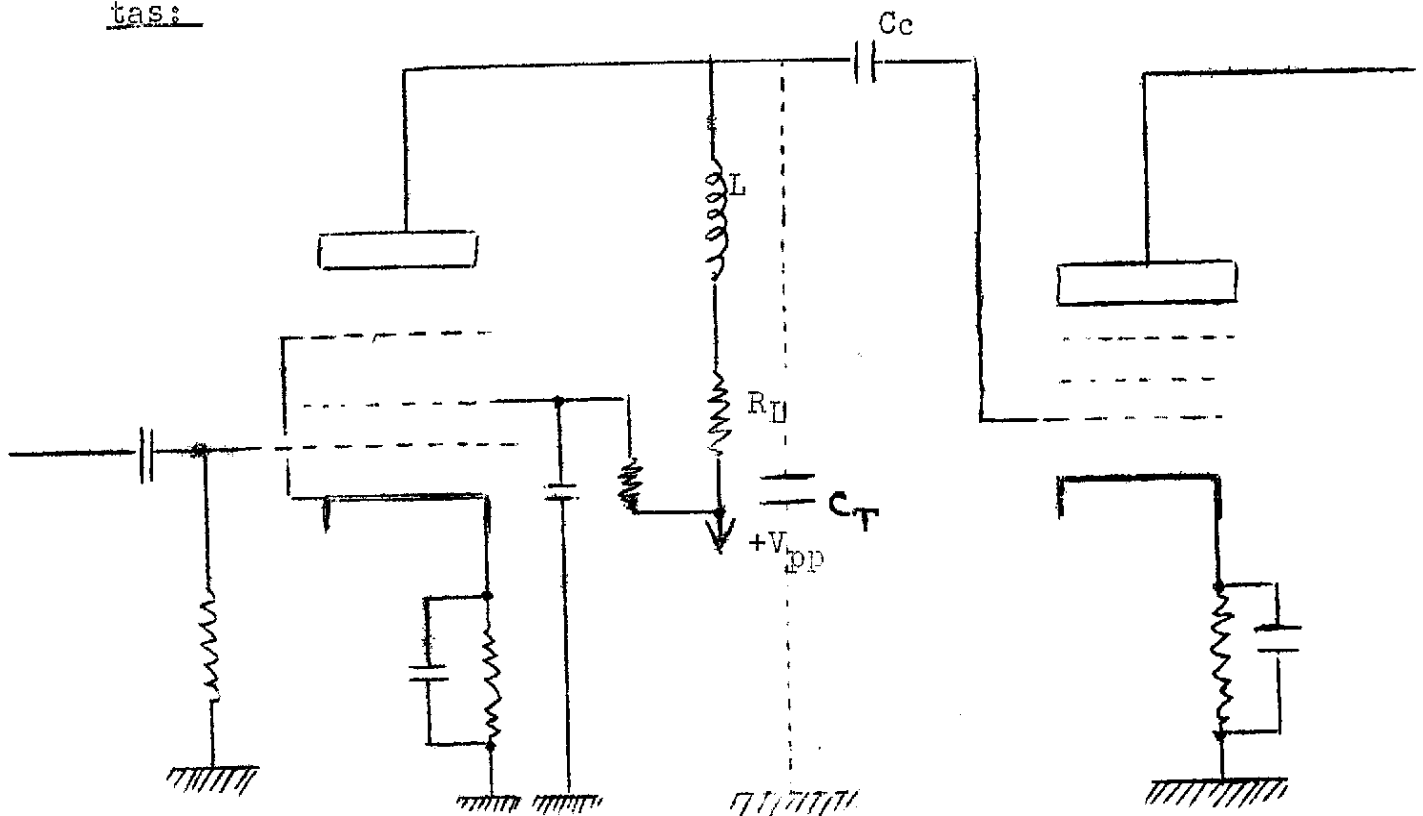
Neste caso teremos transferência máxima de energia do primário para secundário. Se aumentamos o fator de acoplamento K, a banda passante será mais larga, mas em compensação o ganho ficará reduzido.

AMPLIFICADORES DE VIDEO-FREQUÊNCIA

São amplificadores que abrangem uma ampla faixa de frequência indo de poucos Hertz até vários Megahertz.

Esses amplificadores serão utilizados principalmente - em circuito de televisão e radar. Geralmente eles serão constituídos por amplificadores comuns comportando circuitos de compensação.

12) Amplificador VF com compensação paralelo, para frequências altas:



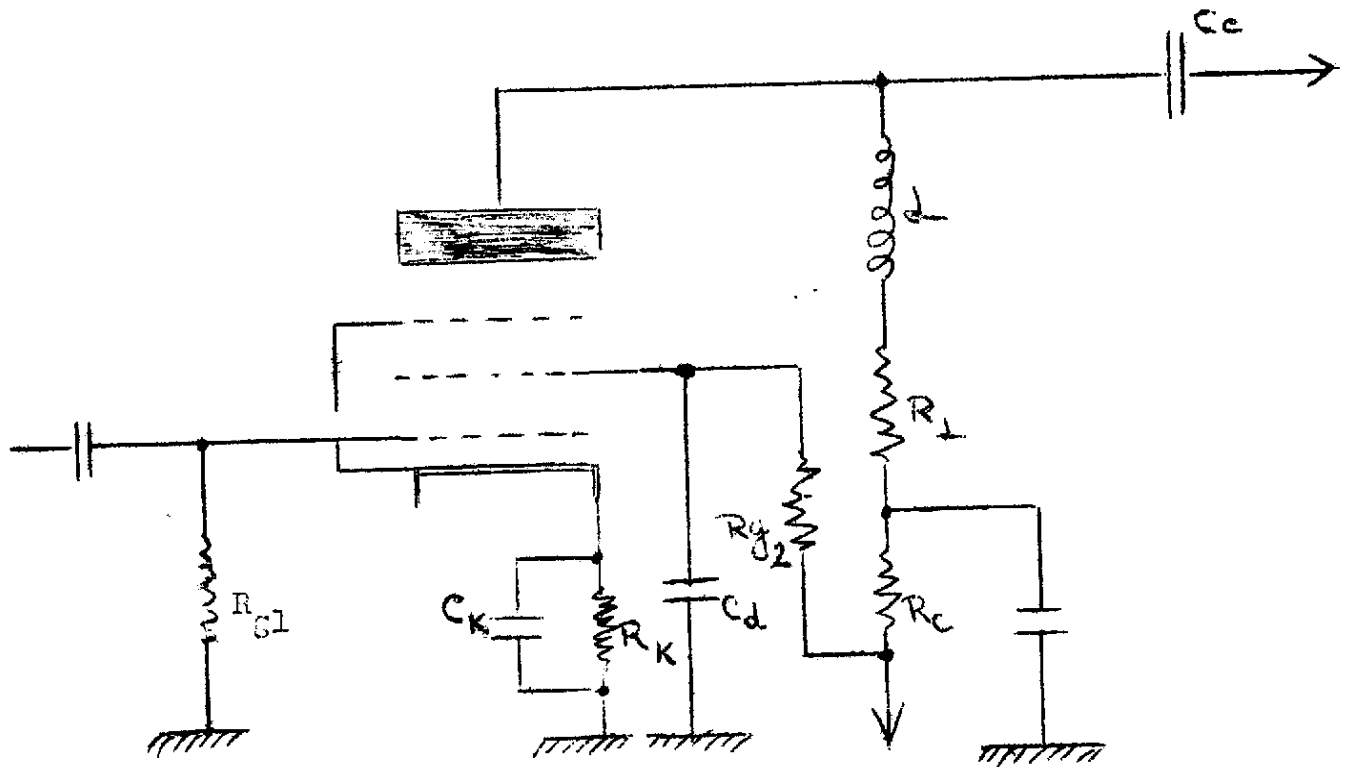
Neste circuito se coloca uma indutância em série com a resistência de carga. Essa indutância tendo um valor muito pequeno não modificará a resposta para as frequências baixas e médias, pois a reatância apresentada será pequena, e o amplificador terá - um ganho dado por:

$$A_v = - g_m R_L$$

Nas frequências altas a reatância apresentada pela indutância será alta, podendo chegar à ressonância com as capacitâncias da válvula e da cablagem do circuito.

II) Amplificador VF com compensação para frequências altas e baixas:

Neste amplificador se acrescenta uma resistência de carga suplementar derivada com um condensador. À frequências baixas a reatância do condensador sendo grande não curto-circuitará a resistência, e a mesma compensará as perdas devidas aos condensadores de acoplamento.



Utilizando essas compensações, chegaremos a uma resposta em frequência relativamente plana de poucos Hertz até vários Megahertz. A maioria dos circuitos de vídeo de televisão utilizarão esta configuração.

MICROFONE E ALTO-FALANTE

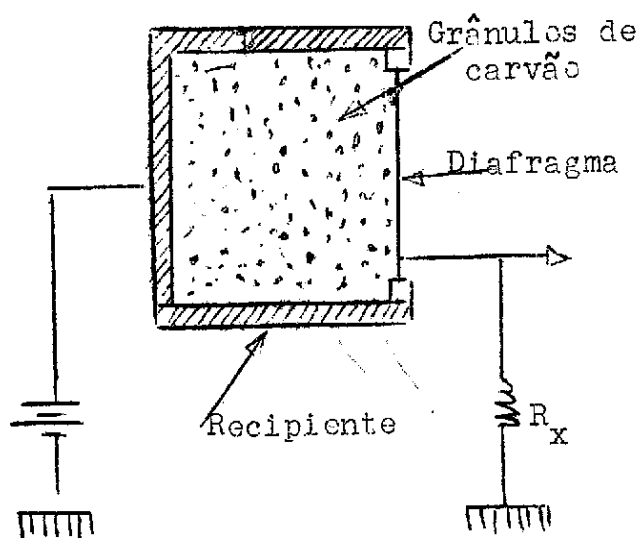
Um microfone é um elemento que transformará uma variação sonora em uma variação elétrica. No seu interior se encontrará um diafragma excitado pela pressão das ondas sonoras, transmitirá as variações recebidas a um sistema de conversão elétrica.

A relação entre a intensidade sonora e a tensão elétrica recolhida constituirá a sua sensibilidade.

Os microfones poderão ser classificados em várias categorias, apresentando características diferentes.

I) Microfone de carvão:

O microfone de carvão é um recipiente de latão fechado por um diafragma geralmente feito de uma lâmina metálica ou de grafita. No recipiente são alojados grânulos pequenos de carvão.

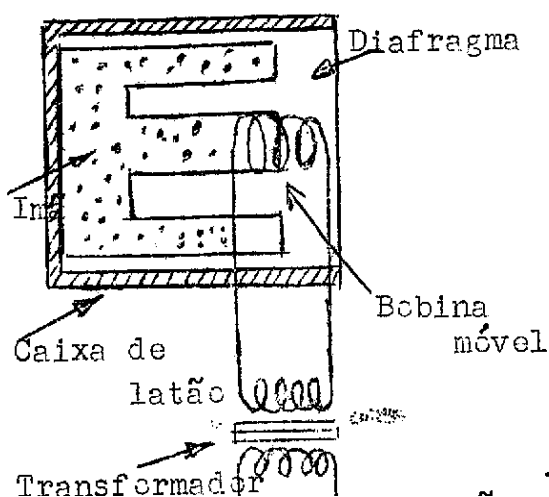


Em série com o microfone se coloca uma pilha e uma resistência fixa. Quando as ondas sonoras pressionam o diafragma, o mesmo por sua vez, pressiona os grânulos do carvão, e consequentemente varia a resistência varia a resistência do microfone. Como colocamos uma pilha e resistência em série com o conjunto, a intensidade da corrente vai variar no circuito. Nos terminais da resistência R_x recolheremos uma tensão variável de mesma frequência do que a onda sonora.

A vantagem deste microfone é a sua robustez e seu baixo custo, mas em compensação apresenta as desvantagens de resposta de frequência limitada e pouca fidelidade, além de necessitar uma fonte externa.

II) Microfone Dinâmico:

No microfone dinâmico uma bobina fica presa ao diafragma e esta suapensa no entre ferro de um possante imã. As ondas sonoras incidindo sobre o diafragma levam a bobina móvel a se movimentar. Sabemos que quando uma indutância se movimenta num campo magnético, se produz uma D.D.P nos seus terminais. Consequentemente, a tensão C.A. será de mesma frequência que as ondas sonoras.

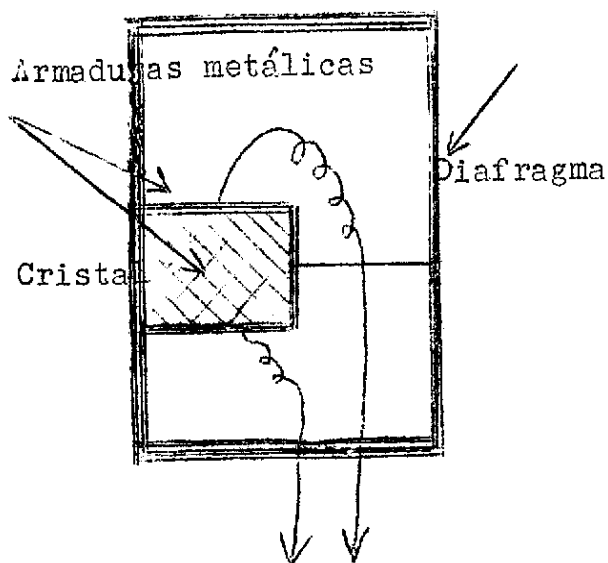


Como a impedância da bobina móvel é muito baixa, precisará de ligar o conjunto a um transformador adaptador de impedâncias.

A principal vantagem do microfone dinâmico é sua curva de resposta em frequência que se estende geralmente de 20 a 12.000 Hertz. Por outro lado a tensão C.A. entregue por ele é pequena.

III) Microfone Piezo - elétrico, ou de cristal:

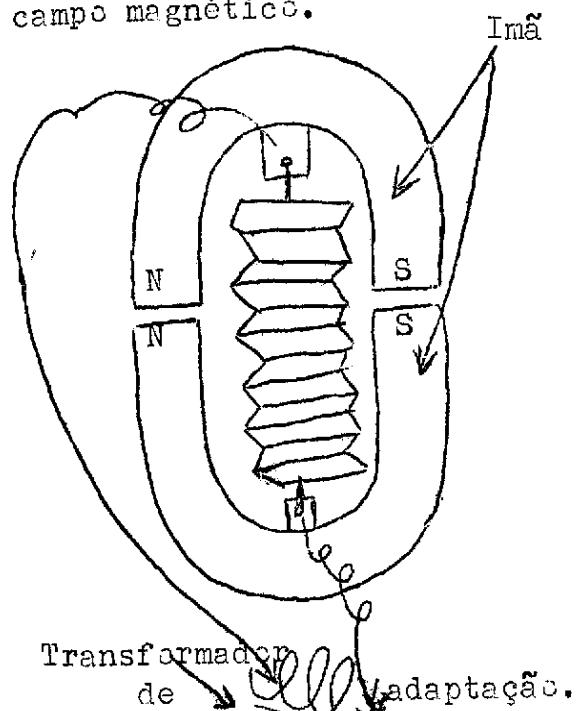
Algumas substâncias tais como o quartzo, sal de Rochelle, têm a propriedade de quando submetidas a deformações, produzir um certo eixo em tensão proporcional a pressão exercida.



Se colocarmos uma ligação mecânica entre o diafragma e o cristal, entre os terminais dos mesmos recolhemos uma tensão CA, cuja frequência será a mesma da onda sonora. Neste microfone não precisará de transformador devido a alta impedância do cristal que atinge vários megachms. Este tipo é muito utilizado pela sua característica de frequência relativamente boa e pela não necessidade de fonte externa.

IV) Microfone de fita:

Consiste em uma fita de alumínio, suspensa num intenso campo magnético.

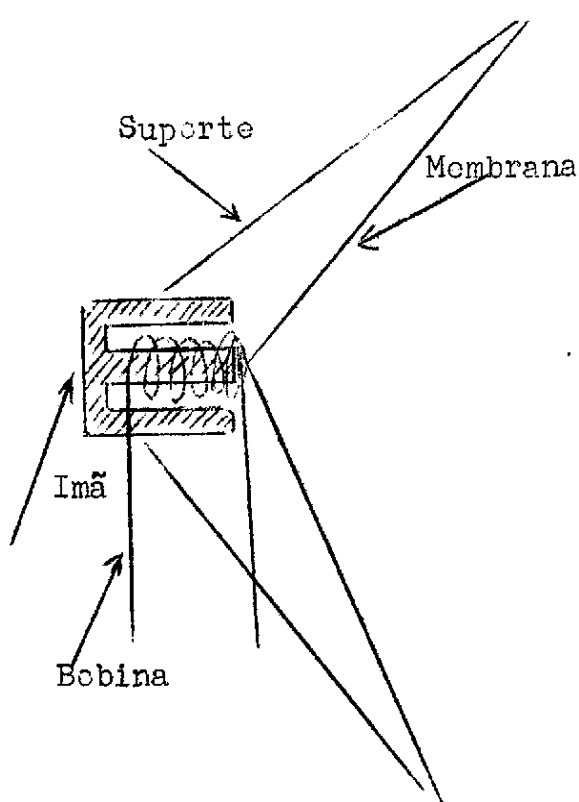


As ondas sonoras movimentam diretamente a fita e pela relação: $E = B.l.v.$ podemos ver que a fita se movimentando a velocidade v , produzirá uma diferença de potência nos seus terminais. Neste tipo de microfone precisará de um transformador de adaptação, pois a impedância da fita é muito pequena. A resposta em frequência de um tal microfone é muito boa, mas em compensação ele é relativamente frágil, o que limita seu emprego.

V) Alto-falante:

O alto-falante é de construção parecida ao microfone dinâmico.

Uma bobine móvel presa, num diafragma, se movimentará livremente no entre ferro de um possante ímã.



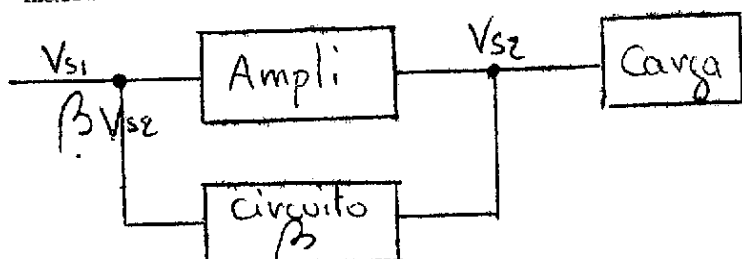
Se aplicarmos uma corrente CA na bobina, ela criará um campo magnético que se atrairá ou repelirá - com o campo magnético criado pelo imã permanente. Consequentemente a bobina sendo solidária da membrana, deslocará a mesma do ritmo da frequência de tensão CA aplicada. O ar será empurrado e produzirá as ondas sonoras. Os alto-falantes serão encontrados comercialmente nas impedâncias de 3,2 - 5 - 8 - 16 - 32 ohms.

Realimentação nos Amplificadores:

Na maioria dos circuitos que estudamos os sinais amplificados prosseguem num sentido só da entrada para a saída. Vamos estudar agora o que ocorrerá quando aplicarmos em fração do sinal de saída na entrada. Essa fração de sinal reaplicada poderá ser em fase ou contrafase com o sinal de entrada. Teremos então realimentação positiva e no segundo caso negativa. A realimentação sendo positiva nos permitirá de aumentar o ganho do amplificador a custa de sua estabilidade e se essa realimentação for suficiente o amplificador funcionará como oscilador. Ao contrário a realimentação negativa, melhora as características do amplificador sendo; aumenta a faixa de resposta do amplificador, reduz as distorções, modifica as impedâncias e características dinâmicas dos amplificadores.

1) Realimentação negativa por malha simples:

Na realimentação por uma única malha, uma fração do sinal de saída é reinjetada na entrada através de um circuito secundário com o sinal de entrada.



Como há defasagem de π entre a entrada e saída, o sinal de realimentação se deduzirá do sinal de entrada reduzindo o mesmo. Se não houvesse realimentação o ganho seria:

$$A_v = \frac{\mu \cdot R_L}{r_p + R_L}$$

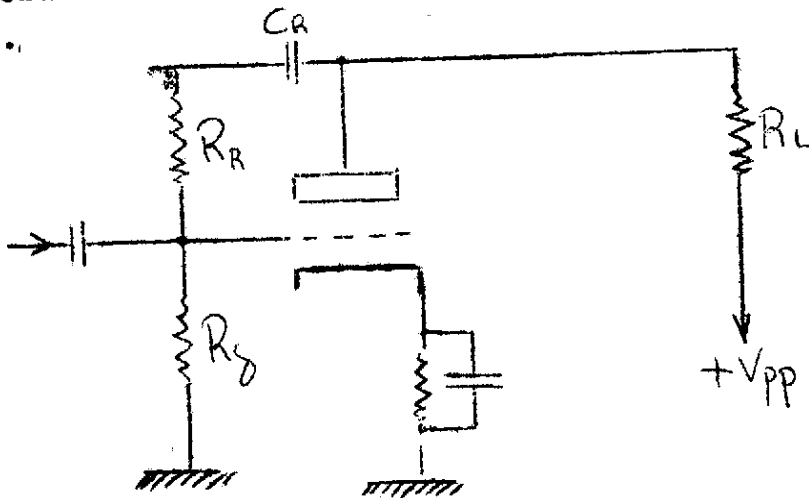
com o circuito de realimentação ligado a tensão de saída passa a ser:

$$V_{s2} = \frac{V_{s1}}{1 - (\beta \mu)} \cdot \frac{R_L}{\frac{r_p}{1 - (\mu \beta)} + R_L}$$

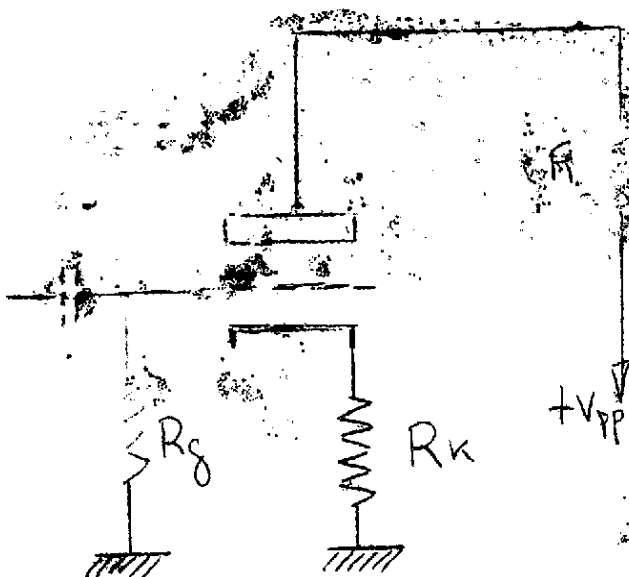
O ganho será então:

$$A_{VR} = \frac{A_v}{1 + \beta \cdot A_v}$$

Geralmente a realimentação será feita através de uma resistência e um capacitor o qual servirá a bloquear a componente contínua.



II) Realimentação negativa pelo catodo:



Podemos também realimentar negativamente um circuito desconectando o condensador de desacoplamento do catodo. Assim, um aumento de corrente, corresponde um aumento de tensão de polarização.

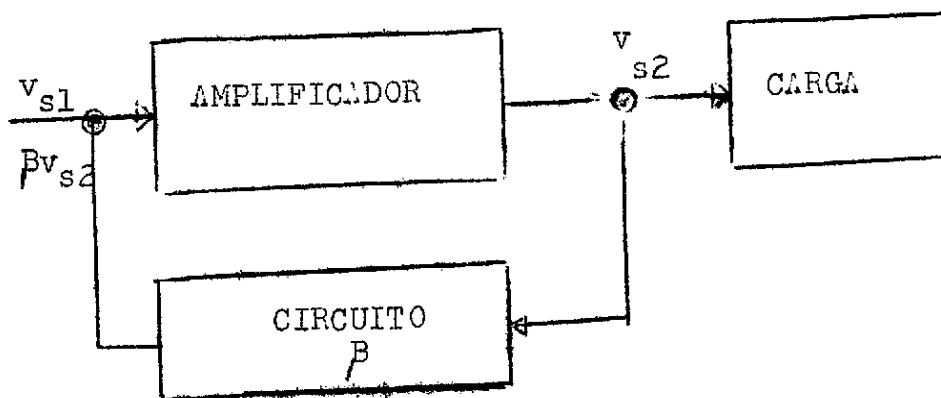
Desta maneira, teremos conseguido também estabilizar o circuito e o ganho do amplificador será:

$$\Delta v_R = \frac{v_{s2}}{v_{s1}} = \frac{\mu \cdot R_L}{R_L + r_p + R_k (\mu - 1)}$$

Este ganho será menor que anteriormente, mas em compensação a banda passante do amplificador será mais larga.

Osciladores:

Se realimentarmos o amplificador positivamente uma parte do sinal amplificado será reintroduzido na entrada se somando a tensão de entrada. Consequentemente a tensão equivalente de entrada será maior, sendo maior a tensão na saída. Como parte desta tensão realimenta a entrada por efeito cumulativo. O circuito passará a oscilar numa frequência que depende dos seus elementos:

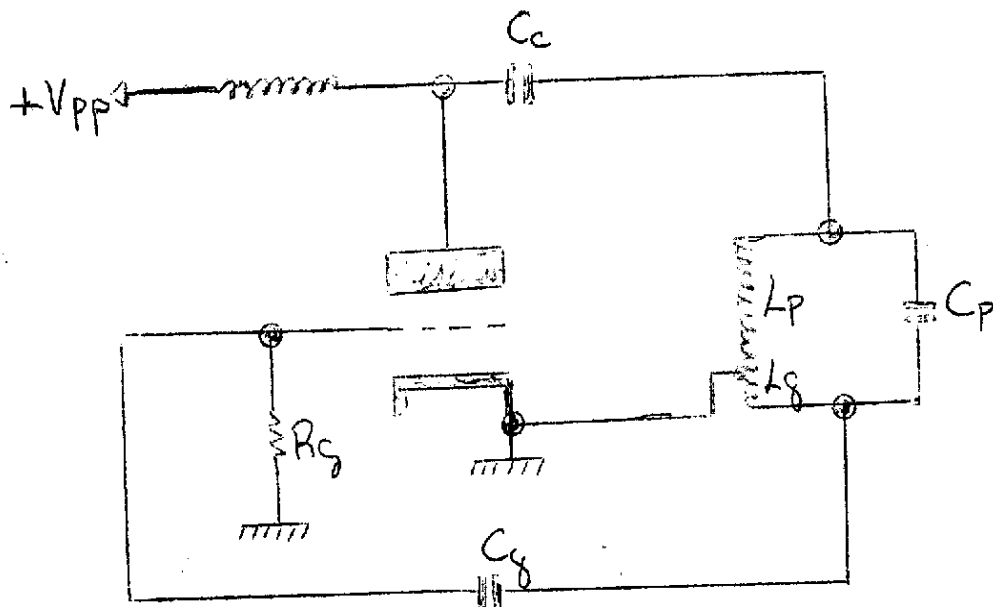


Na maioria dos osciladores os circuitos serão sintonizados, a frequência de oscilação dependendo dos elementos L e C.

Em certos outros para conseguir uma frequência de oscilação muito-estável coloca-se um cristal de quartzo, o mesmo estabilizando o circuito.

1) Oscilador Hartley:

- No oscilador Hartley, a placa é ligada à fonte através de um choque de RF, o mesmo apresentando baixa resistância em cc e alta impedância em CA. A placa é ligada a um circuito sintonizado constituído por L_p , L e C pelo intermédio de um condensador de acoplamento C_c .



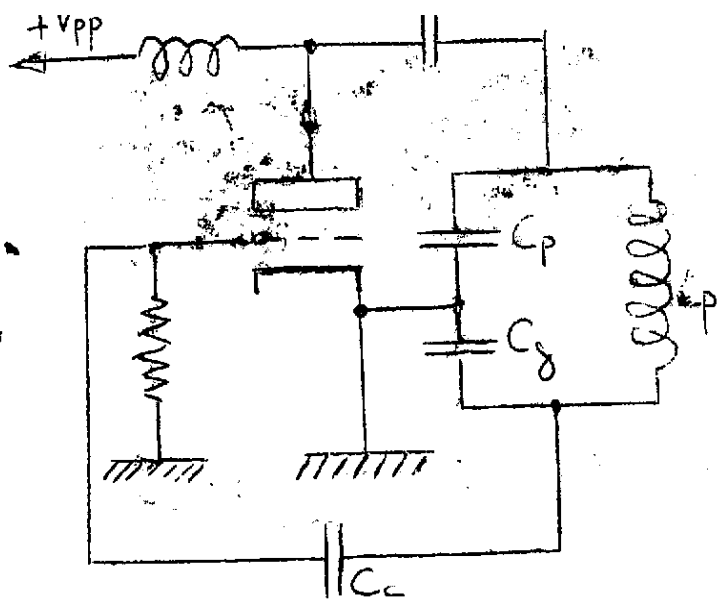
A indutância tendo uma tomada central ligada à massa, se o circuito de placa introduzir uma variação positiva na bobina, do lado da grade, esta variação sofrerá uma rotação de 180° introduzida pelo transformador.

Sabemos que na válvula o sinal sofre uma rotação entre grade e placa de 180° . Como o transformador realimentando a grade introduz uma rotação de 180° , o sinal se encontrará em fase com o de entrada. Com o efeito cumulativo, o circuito passará a oscilar e a frequência dessas oscilações dependem de L e C sendo:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_g + L_p) \cdot C}}$$

II) Oscilador Colpitts:

O funcionamento do oscilador colpitts é sensivelmente igual ao oscilador Hartley, mas no lugar de utilizar um divisor indutivo, utiliza-se um divisor capacitivo. Do mesmo modo, sabemos que entre grade e placa há um defasamento de π seja 180° . O divisor capacitivo nos entregará uma porção de sinal defasada de 180° em relação ao cátodo. Consequentemente, a rotação total do fa



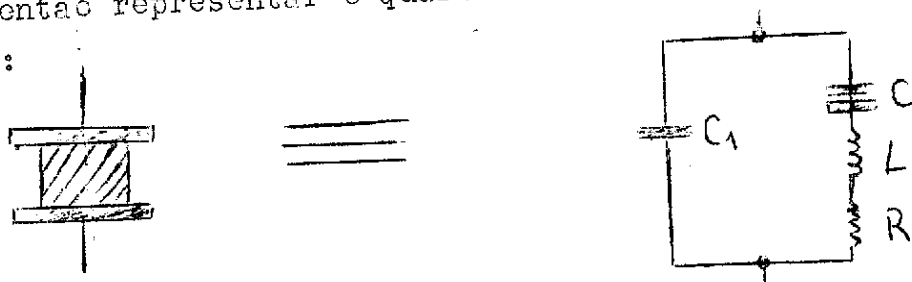
se, sendo de 360° ou 2π o sinal-reinjetado é em fase e se processará a auto oscilação do circuito. Convém também anotar que o valor-realimentação dependerá dos valores da fonte divisora capacitiva- C_p e C_g , o ganho devendo satisfazer a condição. A frequência também será determinada pelo circuito ressonante sendo:

$$F_0 \approx \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_p \cdot \frac{C_g \cdot C_p}{C_g + C_p}}}$$

A principal desvantagem desses circuitos é a não estabilidade, pois em função da temperatura os elementos L e C variam conseqüentemente a frequência de oscilação.

III) Oscilador a Cristal:

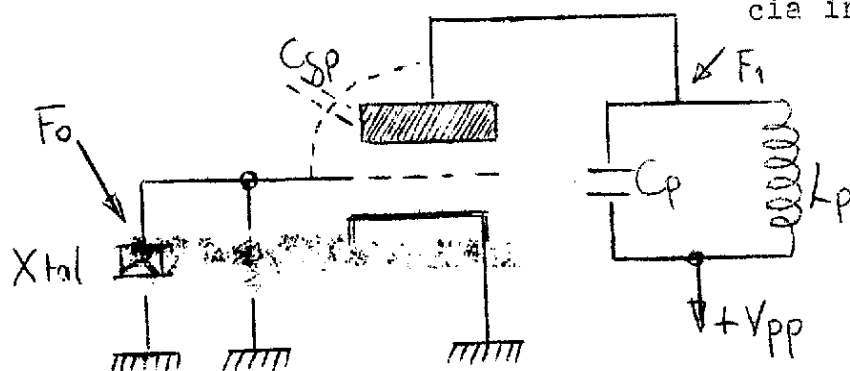
Os osciladores ambos citados tem um grande inconveniente que é a instabilidade em frequência. Sabemos que certos cristais tem a propriedade de produzir D.D.P quando submetido a uma deformação mecânica, e vice-versa. Este efeito será utilizado nos osciladores para estabilizar a frequência. De fato se aplicarmos se aplicarmos uma D.D.P senoidal no cristal, segundo seu eixo elétrico, devido a suas propriedades dinâmicas a lâmina de quartzo vibrará, Na sua frequência de ressonância. Essa frequência dependendo principalmente da espessura da lâmina de quartzo. Podemos então representar o quartzo com o seu circuito equivalente sendo:



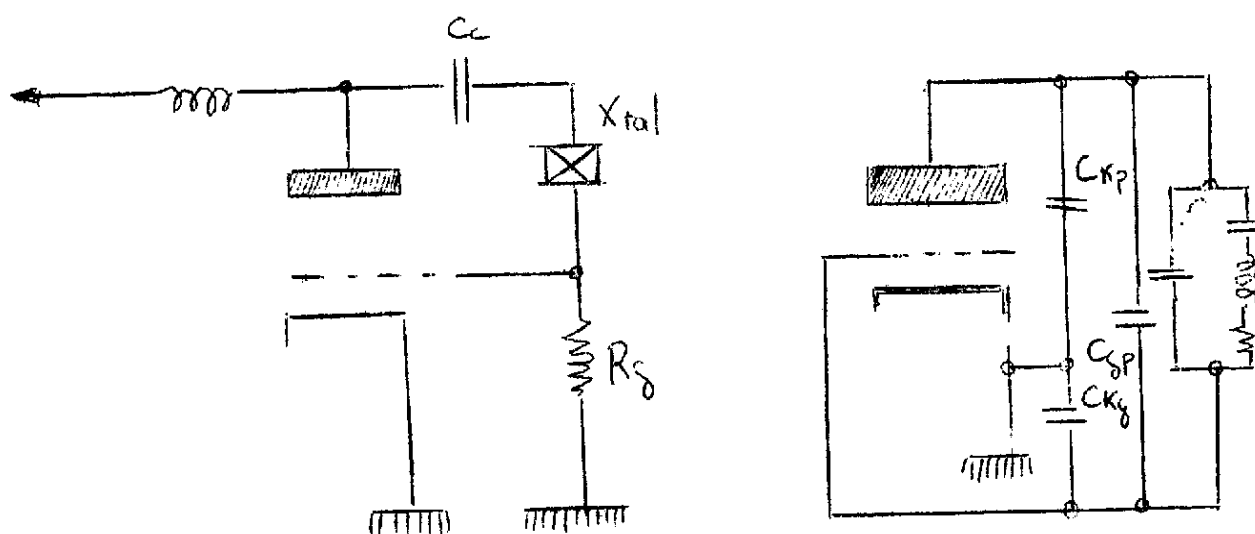
Como uma ressonância série e uma ressonância paralelo. A relação $\frac{L}{C}$ sendo muito grande, o fator de qualidade do circuito é muito elevado sendo exclusivamente limitado por R. Geralmente esse fator será superior a 10^5 .

19) Oscilador Miller:

No oscilador Miller o cristal o -
cristal é colocado na grade da -
válvula e a realimentação feita -
atraves da capacidade interna da -
válvula C_{gp} . Para que haja funcio -
namento, o circuito sintonizado de
placa deverá apresentar uma reatân -
cia indutiva ou seja que $F_1 < F_0$.



20) Oscilador Pierce:



No oscilador Pierce a realimentação é feita pelo divisor composto pelas capacidades internas da válvula C_{gk} , C_{gp} e a frequência de oscilação é diretamente controlada pelo cristal, pois o mesmo é utilizado como circuito tanque da válvula.

Na prática quando se necessita estabilidade, os osciladores a cristais serão sempre preferidos, pois a deriva em frequência é muito pequena, sendo geralmente inferior a 10^{-6} seja menos de 1 Hz de variação para uma oscilação de 1 MHz.

Consequentemente em tais osciladores a frequência produzida depende exclusivamente das características do cristal.