

O Amplificador Operacional

Os modelos dos sistemas de controlo do mundo real normalmente têm como objetivo acionar atuadores para que o sistema se ajuste a um determinado objetivo. Os primeiros sistemas de controlo eram do tipo *feedforward* em que a partir do conhecimento das variáveis de entrada se introduziam sistemas de compensação para se agir sobre o sistema e se atingir um dado valor da saída desejada.

Na Fig. 1 pode observar-se um diagrama geral de um sistema de controlo baseado na ação sobre o sistema e numa retroação em que pretende avaliar o resultado da ação e comparar o seu valor com um valor pretendido, isto é, avaliando o erro entre estes dois valores e controlando o sistema a partir do erro, tentando minimizá-lo.

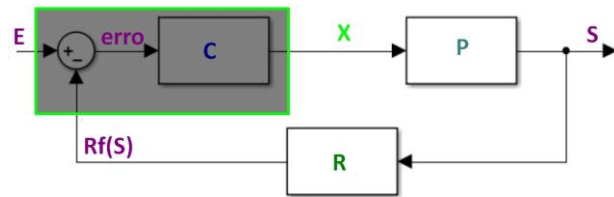


Fig. 1 – Modelo geral de um controlador do sistema P baseado em retroação, R.

Pode mostrar-se facilmente que, mesmo em sistemas que são não lineares, se CP tiver um valor muito elevado, a relação entre a saída, S, e a entrada E, depende quase exclusivamente de $1/R$. R pode ser definido com características muito precisas e estas condicionarão a característica global do sistema

Na prática procura-se ter um valor de C muito elevado e o bloco assinalado a cinzento na Fig.1 pode ser um amplificador diferencial que calcula o valor de $E - Rf(S)$ designado por erro e amplifica muito este valor.

De um modo geral os sistemas reais podem ser modelados e envolvem equações diferenciais não lineares, que não têm solução matemática simples. Os blocos computacionais destes sistemas envolvem normalmente componentes de alta precisão: amplificadores, somadores, diferenciadores, integradores, bem como algumas funções não lineares.

O bloco designado por amplificador diferencial com elevado ganho pode servir de base para realizar todas estas funções e é designado por amplificador operacional.

Amplificador Operacional

Os amplificadores usados em sistemas de controlo eram, inicialmente, realizados com válvulas eletrónicas e componentes passivos que processavam sinais contínuos e também sinais com frequências elevadas.

A utilização da realimentação negativa para estabilizar os amplificadores deve-se a [Harold S. Black](#), (1898-1983), investigador dos [Bell Labs](#), EUA, que, em 1927, submeteu uma patente do [amplificador com realimentação negativa](#), mas a sua realização experimental só ocorreria por volta de 1936, ano em que o britânico [Alan Blumlein](#) (1903 -1942) também patentearia um amplificador semelhante.

Em 1941, [Karl Swartzel](#) (1907-1998), investigador dos Bell Labs, patenteia o uso de um amplificador para fazer operações com sinais ([US 2401779](#)).

Nos [Bell Labs](#) foram desenvolvidos vários amplificadores dedicados que foram usados em sistemas militares, nomeadamente em controladores de tiro para sistemas de artilharia antiaérea. Estes sistemas tinham de ser muito rápidos e as equações de controlo eram feitas pelos então designados computadores analógicos.

Em 1943, [Loebe Julie](#) (1910-2015), investigador da [Columbia University](#), Nova Iorque, EUA, desenvolveu um amplificador operacional a válvulas para o sistema de tiro de artilharia M9 dos EUA, que foi usado para fazer várias contas com sinais elétricos.

O responsável pelo trabalho de Loebe, [John R. Ragazzini](#) (1912-1988) publicou um artigo, em 1947, com a terminologia de “amplificador operacional” fazendo uma referência muito sumária ao trabalho inovador de Loebe.

Neste artigo, Ragazzini, incluiu exemplos do uso do amplificador operacional para realizar integradores, diferenciadores etc. Na realização destes sistemas foi muito importante a ajuda do estadunidense [George A Philbrick](#) (1913-1974).

G. Philbrick é considerado o pai da computação analógica pois foi dos primeiros investigadores a projetar e a usar amplificadores a válvulas em sistemas de controlo, em tempo real, ainda antes da 2ª guerra mundial.

O primeiro amplificador operacional comercializado foi fabricado pela empresa George A. Philbrick Researches (GAP/R) em 1952, com a designação GAP/R K2-W. Este amplificador foi projetado por [Loebe Julie](#), que aceitou o desafio de G. Philbrick de, em 30 dias, projetar e demonstrar um amplificador, muito mais pequeno do que os que estavam a ser usados no projeto de [controlador de tiro M9](#) para o exército dos EUA¹. G. Philbrick encomendou imediatamente 50 unidades deste amplificador que iria originar o GAP/R K2-W.

O amplificador GAP/R-K2-W era baseado em quatro tródos incluídos em duas válvulas eletrónicas 12AX7, uma excelente válvula que, em 1949, tinha sido desenvolvida pela RCA ([RCA Victor Co. Inc.](#); [New York \(NY\)](#))²

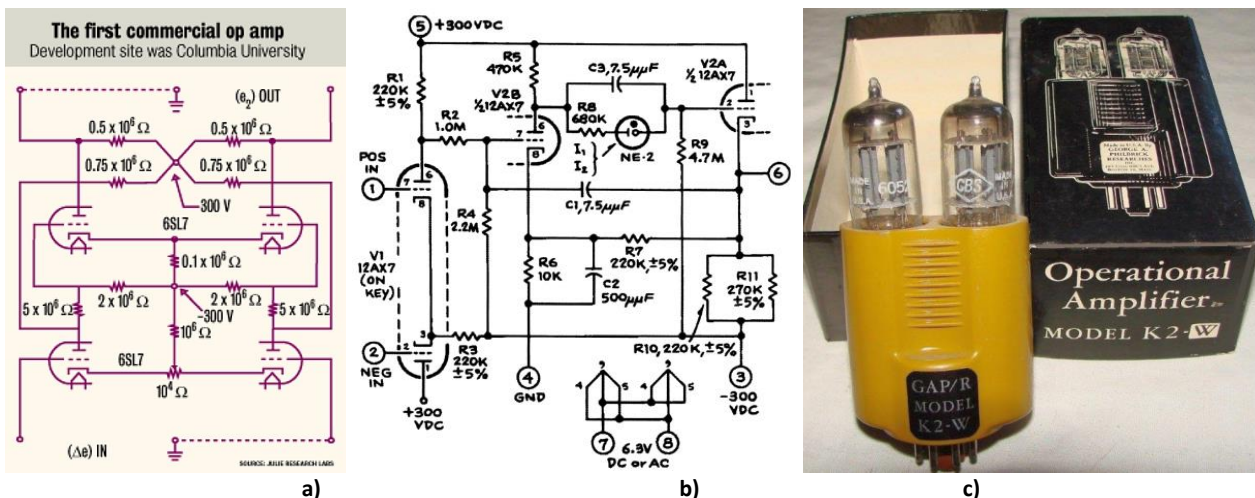


Fig. 2- Amplificador operacional GAP/R K2-W.

a)- Circuito de L. Julie; b) circuito do GAP/R K2-W; c) GAP/R K2-W e embalagem.

Dois dos tródos são usados como amplificador diferencial de entrada, um tródio como amplificador de tensão e o outro tródio como seguidor de cátodo. Usando uma combinação de duas malhas de realimentação negativa e positiva o amplificador obtinha um ganho de tensão à corrente contínua de 15000 (em malha aberta) e uma largura de banda de 100 kHz.

¹ O responsável pelo Laboratório da Columbia University, [John R. Ragazzini](#) (1912-1988), duvidava de que Loebe poderia fazer um amplificador tão simples.

² A 12AX7 contém dois tródos com um ganho alto ganho de tensão ($\mu = 100$). Ainda hoje é um dos dispositivos eletrónicos preferidos pelos audiófilos para realiza amplificadores de áudio devido à excelente linearidade. Com pêntodos eletrónicos conseguem-se maiores ganhos, mas com uma não-linearidade muito maior.

O amplificador GAP/R K2-W requeria duas fontes de tensão contínua de + 300 V e – 300V, relativamente à massa (0 V), e uma fonte de corrente alternada ou contínua de 6,3 V para aquecer o cátodo das válvulas.

Loebe Julie já tinha projetado o primeiro amplificador operacional em 1943, mas a forma compacta do GAP/R K2-W, usando as “recentes” válvulas miniatura 12 AX7, acabou por ser produzida em série por G. A. Philbrick. Loebe Julie seria, mais tarde, o fundador da [Julie Reserach Labs](#).

Todos os componentes do GAP/R K2-W foram acomodados numa embalagem (Fig. 2c) e as ligações de entrada, de saída e de alimentação eram feitas com base num suporte octal que, na época, era usado pela geração de válvulas mais antigas.

Pode ver aqui as características do histórico [amplificador operacional GAP/R-K2-W](#) e, também, exemplos de como ele podia ser usado para fazer as funções normalmente necessárias nos sistemas de controlo.

Para responder às solicitações de várias aplicações que requeriam um amplificador mais rápido, com maior corrente e maior tensão de saída, a empresa GAP/R introduziu, em 1955, o amplificador GAP/R K2-X, projetado por Philbrick e [Roger Noble](#). Este amplificador usava três válvulas eletrônicas (tríodos) e um pêntodo. Estes dispositivos estavam encapsulados em duas válvulas eletrônicas, uma 12 AX7 com dois tríodos e uma 6AN8, com um pêntodo e um tríodo, válvula que tinha sido introduzida pela RCA em 1954. Foi possível manter o mesmo esquema de ligações com o exterior, usando o mesmo suporte octal. Assim, o novo amplificador operacional ficou compatível com o anterior permitindo fazer melhorias de desempenho dos circuitos que usavam o GAP/R K2-W.

Este amplificador já obtinha um ganho de tensão de 30000 e uma largura de banda de 250 kHz em malha aberta, com um consumo de corrente de cerca de 10 mA em cada uma das fontes de alta tensão de 300 V e de 0,75 A na fonte de 6,3 V.

Em 1955, o amplificador operacional GAP/R K2-X teve uma versão reforçada, mais potente, designada por GAP/R K2-XA, um projeto da autoria de Robert Allen Pease, [Bob Pease](#) (1940-2011). Em 1961, este amplificador seria renovado por [Roger Noble](#), mantendo a designação, mas foi adicionado um transístor de junção bipolar, como seguidor de emissor numa malha de realimentação. Este foi o primeiro amplificador operacional que misturou válvulas com transístores (ver esquemas dos circuitos, Fig.4).



Fig. 3- AMPOP GAP/R K2-X; AMPOP GAP/R K2-XA e caixa de transporte.

Ainda em 1961, surgiram os primeiros amplificadores operacionais a transístores, como veremos mais adiante. O GAP/R K2-XA foi produzido com suporte em resina fenólica mas, no final de 1961, foi introduzida uma versão em [lexan](#), de cor cinzenta, que resistia mais à temperatura desenvolvida pelo amplificador operacional, Fig.3.

No Museu Faraday do IST existe uma unidade do amplificador operacional GAP/R K2-XA que foi gentilmente cedida pela [Profa. Helena Avelino](#), esposa do [Prof. José Manuel Igreja](#)³ fundador da Servotrol justamente com o seu pai, Virgílio Cardoso Igreja.

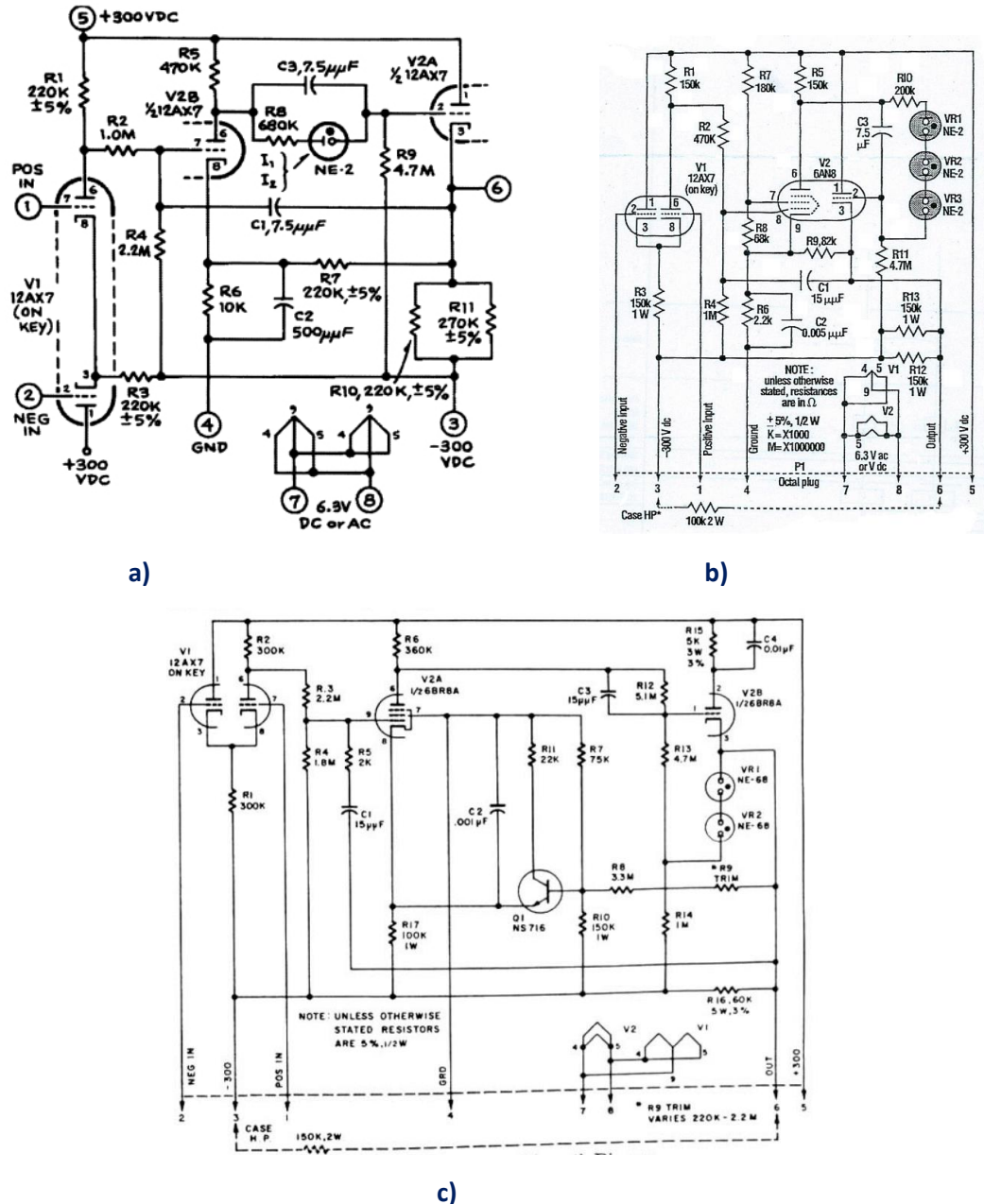


Fig.4 – Evolução dos circuitos dos Ampops GAP/R : a)- GAP/R-K2-W; b) GAP/R K2-WX; c)- GAP/R K2-XA.

³-O Prof. José Manuel Igreja foi docente do IST, responsável pela antiga disciplina de Servomecanismos.

Em muitas aplicações os erros de polarização em corrente contínua (*offset*) poderiam originar um mau funcionamento dos circuitos, nomeadamente quando se realizam amplificadores com elevados ganhos de tensão ou em circuitos integradores de tensão.

G. Philbrick criou alguns amplificadores auxiliares dotados de *choppers* eletromecânicos, designados por [amplificadores estabilizadores da tensão de desvio](#) (*offset*). G. Philbrick materializou aqui a ideia de [Edwin Goldberg e Jules Lehmann](#) que, em 1949, inventaram e patentearam este processo de redução de erros nos amplificadores de corrente contínua (pat. US2684999).

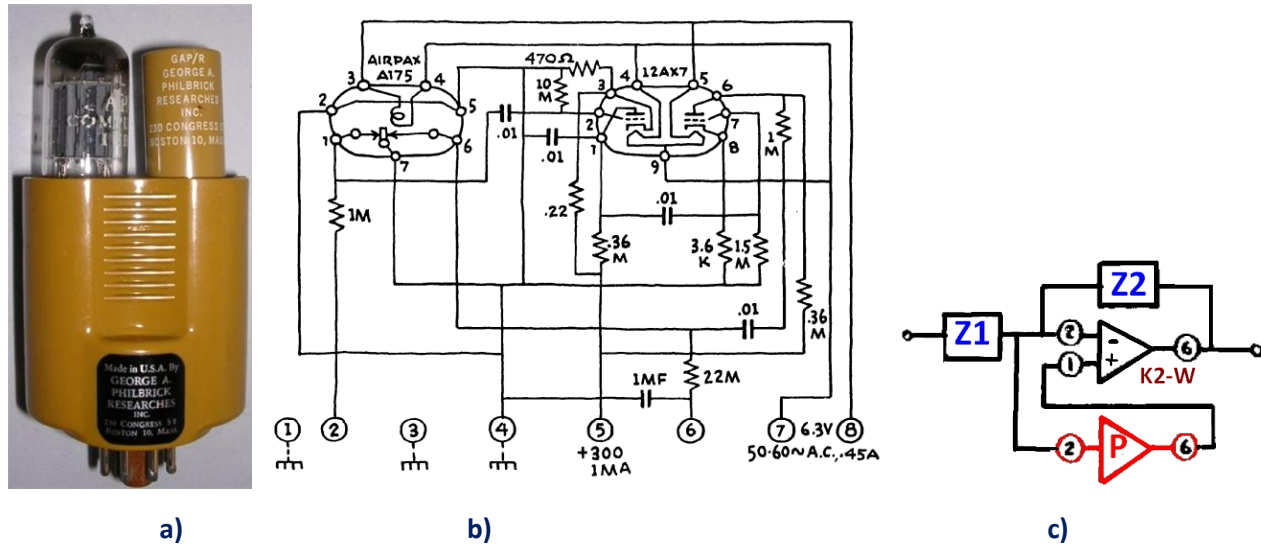


Fig. 5- GAP/R K2-P e montagem inversora com este amplificador e com o GAP/R K2-W.

Na Fig.5a) pode ver-se a imagem do amplificador estabilizador a válvulas, [GAP/R K2-P](#), introduzido por G. Philbrick em 1953. Este amplificador é baseado numa válvula 12AX7 e no comutador eletromecânico Airpax A175. Na Fig. 5b) pode observar-se o esquema elétrico deste amplificador e na Fig. 5c) observa-se um exemplo de aplicação numa montagem inversora com ganho de tensão $-Z2/Z1$, usando o GAP/R K2-W e o GAP/R K2-P.

Uma versão bastante melhorada deste amplificador estabilizador, designada por GAP/R SK2-P, Fig. 6, foi introduzida por G. Philbrick por volta de 1960 usando agora uma embalagem mais complexa, mas continuando a manter a compatibilidade de terminais com o GAP/R K2-P. No Museu Faraday existe um amplificador GAP/R SK2-P que foi doado pela [Profa. Helena Avelino](#)⁴.



Fig. 6 – Amp. Estabilizador GAP/R SK2-P.
(Museu Faraday)

⁴ Este amplificador fez parte dos instrumentos de investigação da empresa portuguesa Servotrol e foram doados ao Museu pela Profa. Helena Avelino, [esposa](#) do professor [José Manuel Igreja](#) fundador da Servotrol juntamente com o seu pai, Virgílio Cardoso Igreja.

Os primeiros amplificadores operacionais a transístores

Com a chegada dos transístores ao mercado, começaram a ser fabricados amplificadores operacionais

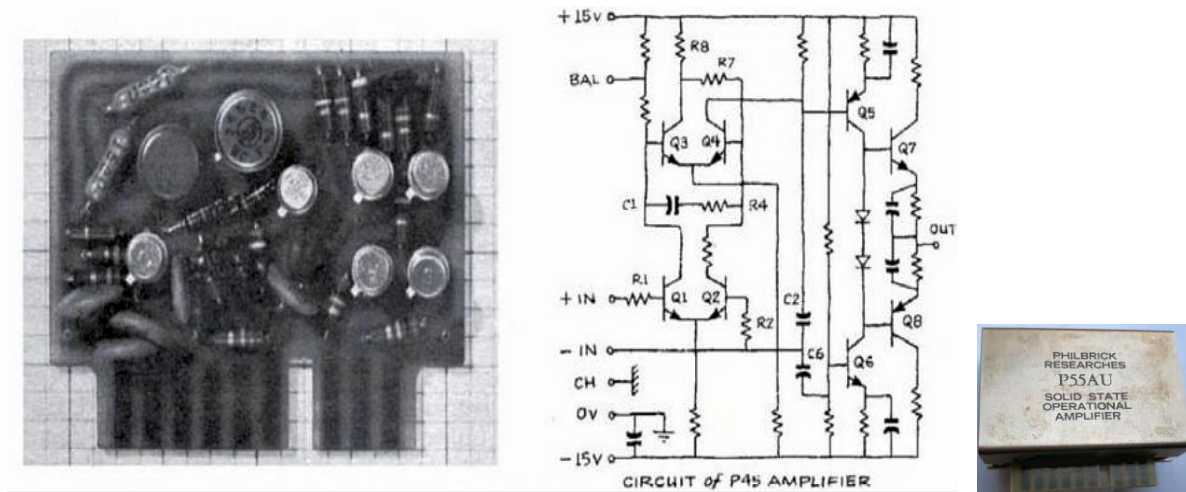


Fig. 7- Amplificador GAPR P45 e GAPR55

usando transístores e outros componentes discretos como, por exemplo, o Philbrick P45 e o P55AU, e o P65, Fig. 7.

As arquiteturas inovadoras destes amplificadores operacionais transistorizados foram a base para a criação dos primeiros amplificadores operacionais monolíticos.

Também aqui se instituiu o uso de fontes de alimentação contínua de +15 V e -15 V, que ficou como norma, inclusive para os futuros circuitos integrados analógicos monolíticos

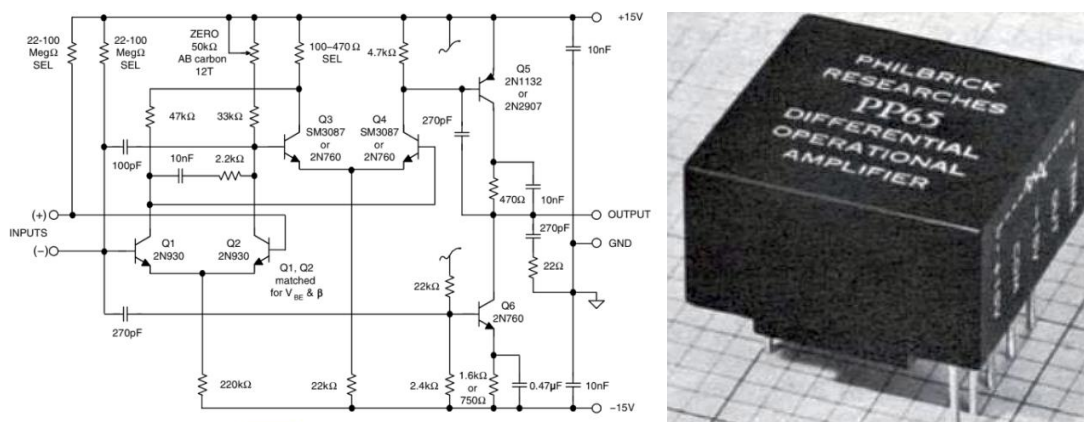


Fig. 8- Ampop. GAPR P65 e GAPR PP65 a transístores discretos.

Em 1961, Alan Pearlman projetou o amplificador operacional GAPR 65 e, logo em 1962, este amplificador originou a versão GAPR PP65, encapsulado numa caixa com resina (P de *poted*), Fig. 8.

Muitos dos amplificadores operacionais da Philbrick, a válvulas e a transístores, foram projetados pelo renomado projetista de circuitos analógicos, engenheiro Robert Allen Pease, [Bob Pease](#). Entre os circuitos desenvolvidos por Pease, em 1963, está o amplificador operacional GAPR 45 que já fez uso de transístores

bipolares de junção, do tipo NPN e PNP, que introduziram vários benefícios, nomeadamente uma maior facilidade de projeto dos amplificadores.

O nascimento do amplificador operacional monolítico

Em 1957, oito renomados cientistas abandonam a empresa de William Schokeley, um dos inventores do transistor e formaram a empresa [Fairchild](#) que viria a fabricar o primeiro amplificador operacional monolítico, o uA702 em 1963, Fig.9, usando um novo processo tecnológico sobre uma bolacha de silício.

Em 1961 [Jean Hoerni](#) (1924-1997), o pai da tecnologia planar de fabricação de transistores e do transistor de efeito de campo, JFET, deixou a Fairchild, que tinha ajudado a fundar, e cofundou a empresa Amelco, focada em produzir eletrônica de elevado desempenho, nomeadamente eletrônica para aplicações Espaciais usando a tecnologia de circuitos integrados híbridos, baseada no uso de filmes e de circuitos discretos.

A empresa Fairchild acabou, mais tarde, por publicar [o bloco de notas de Jean Hoerni](#) onde podemos ver os relatos do seu trabalho diário feito nesta empresa que ajudou a fundar.

O amplificador operacional uA702 resultou dos esforços do [irreverente](#) projetista de circuitos, [Robert Widlar](#) (1937-1991) e de Dave Talbert, especialista em tecnologia, para projetarem circuitos analógicos na tecnologia da Fairchild que tinha sido otimizada para fabricar circuitos digitais.

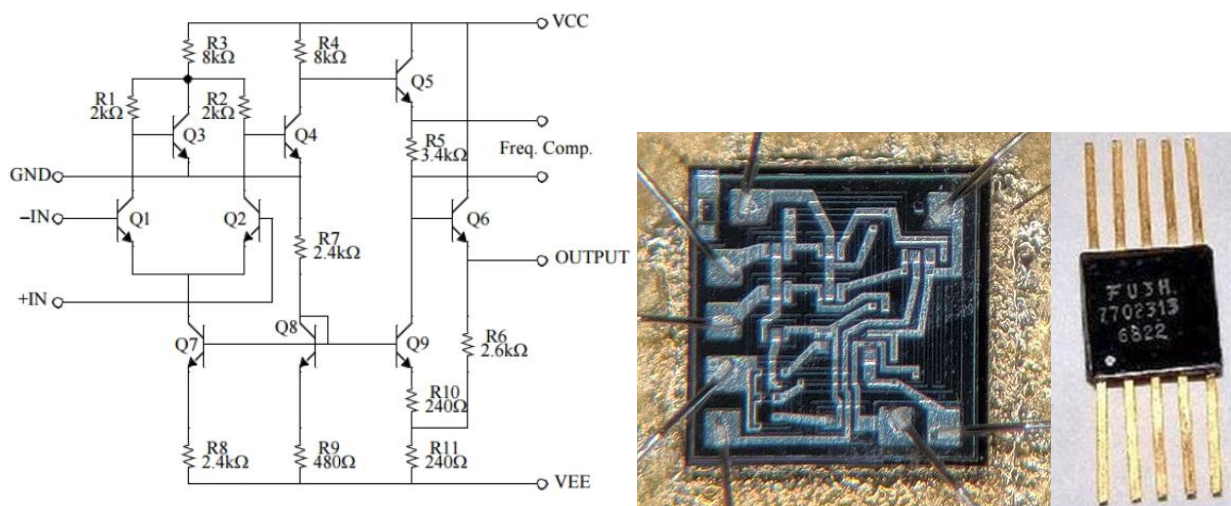


Fig. 9 - Amplificador operacional uA702.
a)- Esquema elétrico; b) fotografia interna do circuito; c) Primeiro aspeto do ampop.

O uA702 beneficiou do conhecimento adquirido nos amplificadores operacionais a válvulas, nomeadamente na utilização de realimentação positiva no andar diferencial de entrada que Bob Pease já tinha usado para aumentar o ganho de tensão do primeiro andar amplificador, mas o benefício fundamental foi a utilização dos novos transistores laterais do tipo PNP.

Os primeiros amplificadores operacionais uA702 foram vendidos muito caros (equivalente a cerca de 1500 dólares atuais EUA), mas o seu uso generalizou-se e acabaram por ter um preço acessível.

Nos anos seguintes foram projetados amplificadores operacionais monolíticos com melhores características do que as do uA702, como o uA709 e o uA741. Este último acabou por ser o mais fabricado dos amplificadores operacionais.

O amplificador operacional híbrido

Em 1965, o renomado projetista de circuitos analógicos, engenheiro Robert Allen Pease, [Bob Pease](#), desenvolveu, um amplificador operacional de elevado desempenho denominado Q25H, que foi fabricado pela empresa Amelco, especializada na fabricação de circuitos integrados híbridos.

Os primeiros amplificadores operacionais monolíticos não cumpriam especificações muito exigentes, basicamente eram a réplica de arquiteturas desenvolvidas anteriormente em amplificadores com transistores discretos e havia um mercado para amplificadores mais exigentes.

Bob Pease, nas discussões tidas com os engenheiros da Amelco, projetou a arquitetura de um amplificador operacional de ultrabaixo ruído e elevado desempenho que acabou por ser incluído num projeto de um contato entre a NASA e a Amelco, envolvendo amplificadores estado da arte.

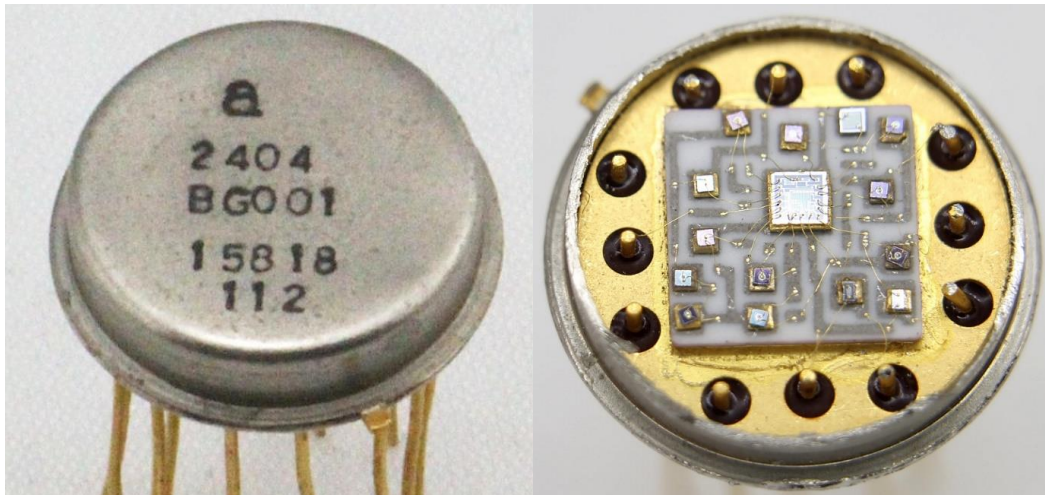


Fig.10 - Exterior e interior do amplificador operacional híbrido A2404.

O amplificador operacional foi designado por 2401BG e [foi incluído numa sonda sísmica da Apollo 12](#) que ficou na Lua. Na Fig.10, os pequenos quadrados são transistores que são ligados por fios a ilhas condutoras depositadas sobre o substrato cerâmico. No quadrado maior está um conjunto de resistências de filme fino condutor, que completam o amplificador operacional.

Os amplificadores operacionais foram fundamentais para a criação dos primeiros computadores analógicos que permitiram realizar, em tempo real, a simulações de sistemas físicos, mas à medida que a tecnologia digital se tornou mais proeminente, criaram-se sistemas híbridos com capacidades digitais e analógicas.

O desenvolvimento das arquiteturas dos amplificadores operacionais foram, também, a base das arquiteturas dos amplificadores de áudio de potência *high end*, que ainda hoje são comuns e que são preferencialmente realizados com transistores discretos adequados a cada função específica e sem qualquer recurso a amplificadores operacionais.

Agradecimento especial

À equipa de voluntários do Museu Faraday