

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

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.

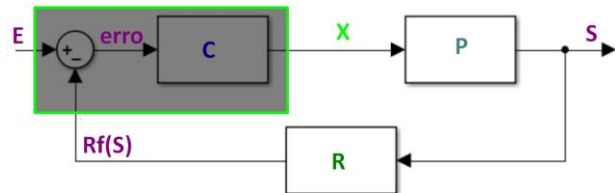


Fig. 1 – Modelo geral de um controlador do sistema P baseado em retroação, R .

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 $E-Rf(S)$ e amplifica muito este valor.

De um modo geral os sistemas podem ser modelados envolvendo 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.

O 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), 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 também o britânico [Alan Blumlein](#) (1903 -1942) também patentearia um amplificador semelhante.

O artigo incluiu exemplos do uso do amplificador operacional para realizar integradores, diferenciadores etc. e contou com 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.

Nos [Bell Labs](#) dos EUA foram desenvolvidos vários amplificadores dedicados que foram 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.

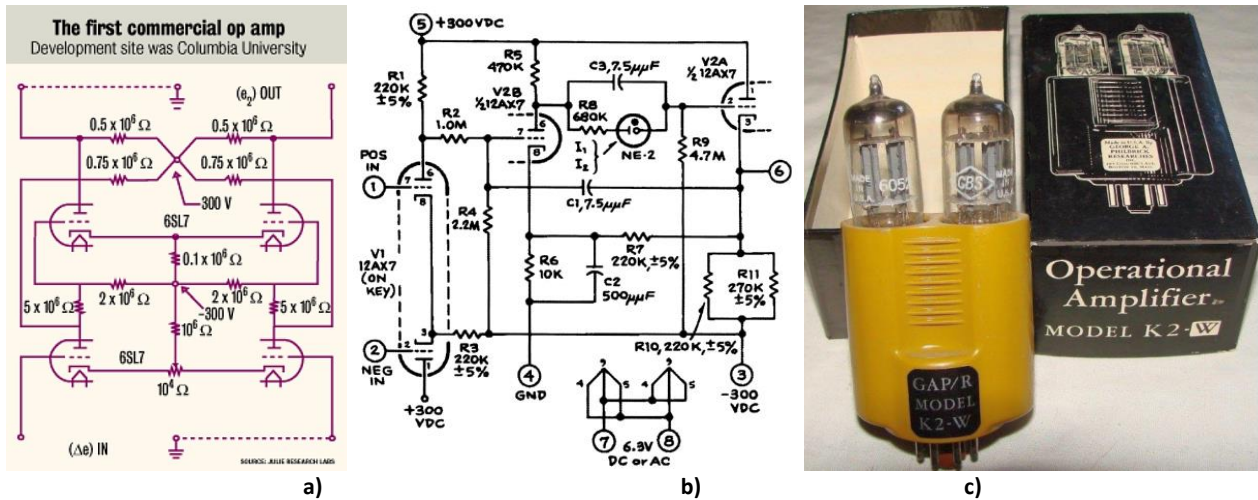


Fig. 2- Amplificador operacional GAP/R K2-W.
 a)- Circuito de L. Julius; b) circuito do GAP/R K2-W; c) GAP/R K2-W e embalagem.

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](#) (1910-2015), um empregado da Columbia University, em Nova Iorque, EUA. Loebe Julie já tinha projetado o primeiro amplificador operacional em 1943, mas a forma compacta do GAP/R W2 foi produzida em série por G. A. Philbrick. L. Julie seria, mais tarde, o fundador da [Julie Reserach Labs](#).

Pode ver, no endereço seguinte, as características do histórico [amplificador operacional GAP/R W2](#) e, também, exemplos de como ele podia ser usado para fazer as funções normalmente necessárias nos sistemas de controlo.

A empresa GAP/R produziu vários amplificadores operacionais a válvulas e até alguns amplificadores estabilizados com *choppers* eletromecânicos, depois de Edwin Goldberg, em 1949, ter inventado e patenteado este processo de redução de erros nos amplificadores de corrente contínua (pat. US2684999).

Na Fig.3 pode ver-se a imagem do amplificador operacional a válvulas, GAP/R SK2-P, existente no Museu Faraday do IST e que foi doado pela [Profa. Helena Avelino](#).

Com a chegada dos transístores ao mercado, começaram a ser fabricados amplificadores operacionais usando transístores e outros componentes discretos como, por exemplo, o Philbrick P45 e o P55AU, e o P65.



Fig. 3 - Ampop GAP/R SK2-P.
 (Museu Faraday)

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

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

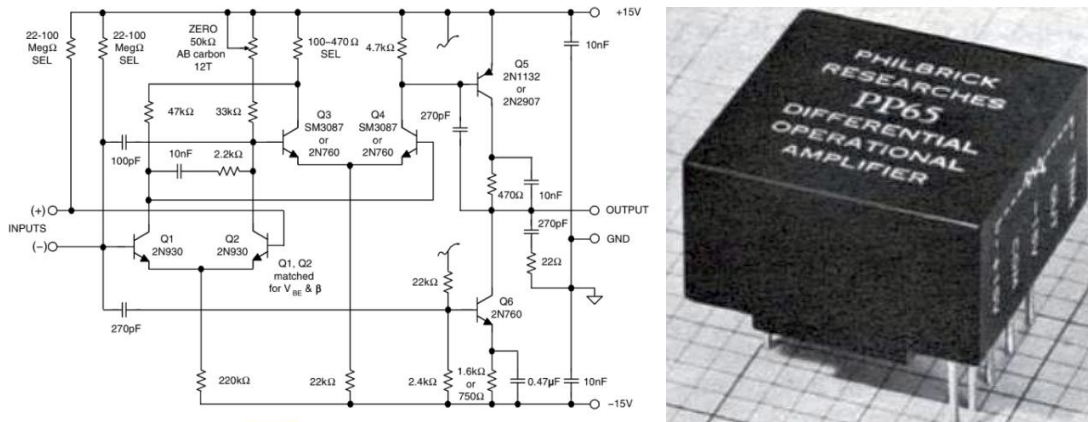


Fig. 4- Ampop GAPR P65 e GAPR PP65 a transístores discretos.

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](#) (1940-2011).

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.

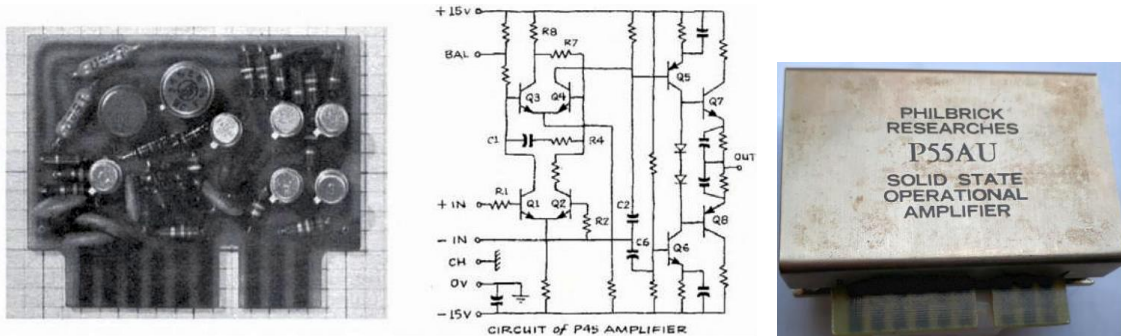


Fig.5- Amplificador GAPR P45 e GAPR55

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, usando um novo processo tecnológico sobre uma bolacha de silício.

Em 1961 [Jean Hoerni](#) (1924-1997), o pai da tecnologia planar de fabricação de transístores 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.

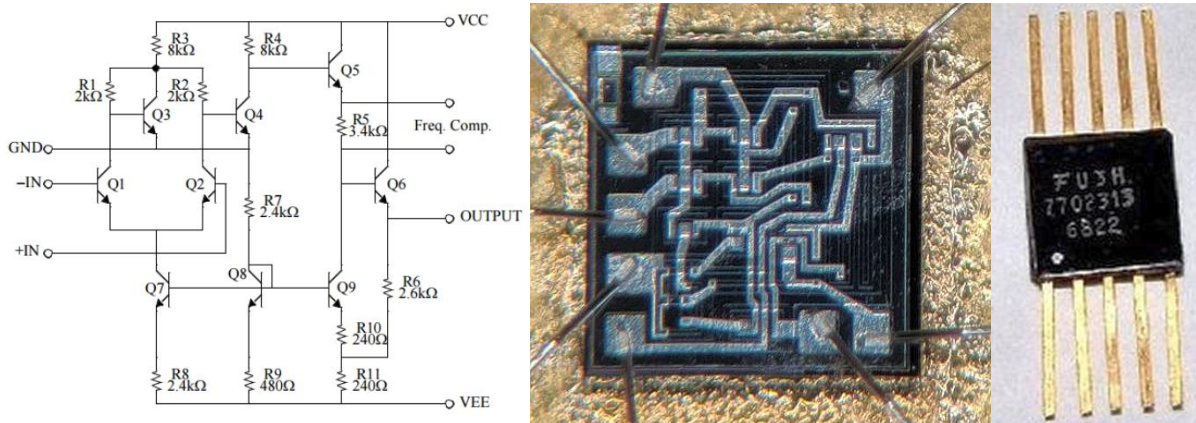


Fig. 5 - Amplificador operacional uA702.
a)- Esquema elétrico; b) fotografia interna do circuito; c) Primeiro aspeto do ampop.

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 transístores 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](#) (1940-2011), 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 transístores 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 ultra baixo 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.

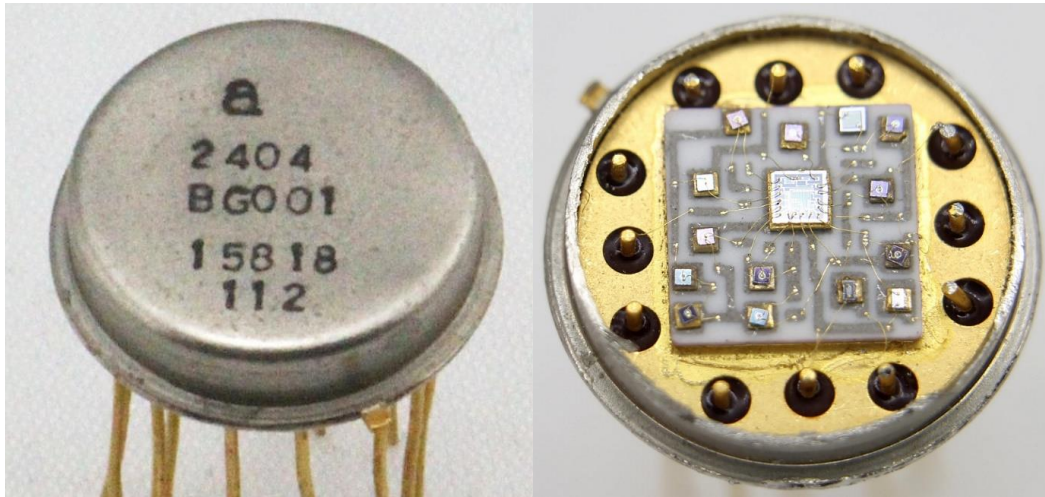


Fig.6- Exterior e interior do amplificador operacional híbrido A2404.

O amplificador operacional foi designado por 2401BG e [foi incluído numa sonda sísmica da Apollo 12](#) que ficou na Lua.

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.

Agradecimento especial

À equipa de voluntários do Museu Faraday.