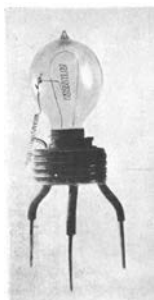


Cem anos do tríodo eletrônico

Atualmente, uma grande maioria de audiófilos, melômanos e músicos, consideram que o melhor som é aquele que é processado por válvulas eletrônicas e, especialmente, as que têm a configuração mais simples - o tríodo. Os melhores amplificadores de áudio "high end", a válvulas, preferencialmente usam tríodos¹ e podem custar preços que podem atingir várias dezenas de milhares de euros (pode ver aqui [alguns exemplos](#)). Mesmo com a evolução dos dispositivos de eletrônica de estado sólido como o transistor, [que recentemente fez 70 anos](#), para se obter uma sensação perceptiva auditiva semelhante às que se obtém com os amplificadores a válvulas é necessário usar regras de projeto dos amplificadores transistorizados diferentes das tradicionais. Poderemos analisar, mais tarde, quais são as razões que podem levar a esta preferência, mas, por agora, talvez valha a pena lembrar a forma atribulada como nasceu o tríodo e como cresceu até estabilizar há cerca de 100 anos.

O nascimento da válvula eletrônica- Ao tentar estudar o problema do escurecimento do vidro das lâmpadas incandescentes Edison acabou por descobrir a emissão termiônica, efeito Edison, e usou-a para fazer um sensor de iluminação para poder controlar os dínamos que produziam a corrente contínua que alimentava as lâmpadas em instalações industriais, pode ver [aqui um resumo desses trabalhos](#). De facto, Edison tinha descoberto o díodo de vácuo, sem se aperceber, mas os créditos desta descoberta viriam a ser atribuídos a John Ambrose Fleming (GB), que, em 1880, nos USA tinha trabalhado com Edison no estudo deste problema do escurecimento das lâmpadas.

O díodo eletrônico- Fleming (mais tarde, nomeado Sir), engenheiro eletrotécnico e professor universitário, que fora aluno de James Maxwell², na Edison Co, em Londres, antes de ser admitido, em 1899, como consultor científico da empresa de Marconi "Wireless Telegraph & Signal Company", empresa que em 1900 foi renomeada para "Marconi's Wireless Telegraph Company".



Um dos primeiros trabalhos de Fleming foi projetar e dirigir a construção da estação de rádio, em Poldhu na Cornuália inglesa, que viria a ser famosa pela primeira transmissão de rádio transatlântica para *Signal Hills* no extremo Este do Canadá, no dia 12 de dezembro de 1901³.

Na Marconi, mas na Grã-Bretanha, Fleming reconstruiu o dispositivo termiônico de Edison e patenteou-o como detetor de ondas de rádio (retificador de rádio frequência, RF) em novembro de 1904. A patente de Fleming GB190424850⁴ não foi inicialmente aceite nos USA, pelos organismos competentes, mas, de facto, foi o primeiro dispositivo da disciplina científica designada por eletrônica e desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento das radiocomunicações, ao servir como alternativa ao detetor de galena e ao coesor de Eduardo Branly de 1890⁵.

A partir da empresa Marconi Americana (U.S.A.) Fleming registou a patente US803684. Nesta patente Fleming propôs o uso do díodo como retificador de meia onda e de onda completa para correntes de alta frequência. Isto permitiria obter correntes contínuas a partir de sinais de RF, capazes de atuarem um galvanómetro de quadro móvel⁶. Todavia, Marconi continuou mais interessado em que Fleming desenvolvesse os detetores de rádio, não baseados no díodo de vácuo, que fornecia a várias empresas. Nesta altura Marconi dispunha do detetor de rádio coesor "Coehrer", desenvolvido por Edouard Branly, mas

¹ Mesmo que usem pêntodos, por vezes podem ser configurados como tríodos.

² Ainda que por vezes único aluno nas, pesadas e difíceis de seguir, aulas de Maxwell, segundo Fleming confessou.

³ São também devidos a Fleming os conceitos de fator de potência (usado na corrente alternada) e a regra da mão esquerda (mnemónica) para indicar o sentido da força gerada por uma corrente elétrica num campo magnético.

⁴ "Improvements in Instruments for Detecting and Measuring Alternating Electric Currents"

⁵ Edouard Branly (FR) "On the Changes in Resistance of Bodies under Different Electrical Conditions", 1890

⁶ Para vários autores Fleming, estava a sofrer de surdez precoce e procurava um dispositivo que visualmente indicasse a presença de sinais de rádio.

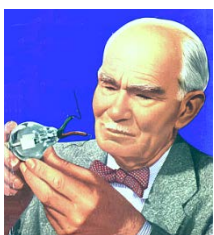
também por muitos experimentalistas e em que Marconi fez algumas modificações e patenteou, depois, como "[Navy detector](#)".

Entretanto, Marconi trabalhava no aperfeiçoamento do detetor de rádio baseado no ruído de Berkausen, existente nos materiais magnéticos com histerese a que chamou *Magie detector*⁷ e que patenteou em 1902; este detetor provou ser mais sensível que o coesor. Marconi não deu muita atenção às potencialidades do díodo de vácuo como detetor de sinais de rádio. Em 1911, no sistema de comunicações do Titanic, Marconi dispunha de três detetores de rádio alternativos⁸: coesor, Magie e díodo de vácuo, mas prioritariamente eram usados os dois primeiros.

O tríodo e Lee de Forest- Em setembro de 1905, Lee de Forest, teve acesso a um artigo sobre a válvula de Fleming nos *Proceedings of the Royal Society* (GB) e encomendou uma réplica da válvula ao fabricante Henry W. McCandless⁹. Em dezembro de 1905 Lee de Forest encomendou outra válvula, com mais um eletrodo em forma de grelha colocado entre o filamento e a placa, mais perto do filamento. Verificou que a aplicação de uma tensão positiva a esta grelha aumentava a corrente de placa do díodo. De Forest não conseguia explicar o funcionamento desta válvula sem ser como um díodo com eletrodo adicional colocado mais perto do filamento e, por isso, muitos especialistas consideraram que isto era um plágio da patente do díodo de Fleming.



Mas, Forest criou, assim, a válvula eletrônica tríodo, a que chamou de "*audion*" e patenteou o resultado. Os primeiros *audions* tinham no seu interior um gás residual¹⁰ que tornava o seu comportamento um pouco errático que até facilitava a detecção dos sinais de rádio pulsados. Só mais tarde, em 1912, De Forest modificou o audion para ter vácuo muito elevado depois dos trabalhos de Irwin Langmuir dos laboratórios da *General Electric* (USA).



Na sua patente de 1907 De Forest propõe ainda o "*external grid audion*" que é basicamente um díodo de Fleming em que é colocado um eletrodo externo colado ao invólucro e que, devido à placa ser aberta, consegue influenciar, a partir do exterior, o movimento dos elétrons entre o filamento e a placa, usando uma diferença de potencial relativa ao filamento, aplicado a esta grelha externa. Com esta invenção de Forest abriu-se o caminho para o conflito com Marconi que referiremos mais adiante.

Os austríacos Robert von Lieben and Eugen Reisz patentearam um tríodo uns meses antes da patente do *audion* mas tiveram várias dificuldades em pôr este tríodo a funcionar e em assegurar a paternidade legal da patente do tríodo.

O tríodo como amplificador- Em 1908, Forest verificou que o *audion* podia amplificar sinais telefônicos com alguma sensibilidade. O funcionamento do *audion* como amplificador, com carga resistiva na placa, apresentava ganhos de tensão muito pequenos (menores que cinco) o que era insuficiente para muitas aplicações¹¹. Usavam-se transformadores elevadores de tensão para acoplamento do sinal à grelha do *audion* (tipicamente numa relação de transformação menor do que 1:5). Este conjunto poderia originar um ganho de tensão máximo de 25 vezes.

Em 1911, von Lieben e Eugen Reisz, depois de vários aperfeiçoamentos, apresentam o seu tríodo, já funcional, com vácuo parcial de vapor de mercúrio e conseguem realizar amplificadores com ganhos de tensão de cerca de 30 vezes.



⁷ O detetor magnético foi baseado no [trabalho de Ernest Rutherford publicado em 1897](#).

⁸ Pode ver aqui uma excelente revisão sobre os primeiros detetores de rádio no livro do Prof.V. Philips "[Early Radio Wave Detectors](#)", de 1980.

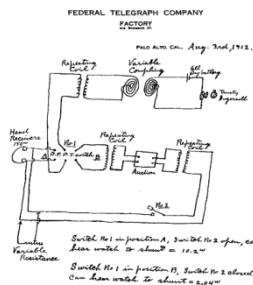
⁹ McCandless produzia as lâmpadas de incandescência Mazda para automóvel (marca de Edison) para a *General Electric* e para a *Westinghouse*.

¹⁰ Até 1912 havia a convicção de que um pouco de gás rarefeito, no interior da válvula, melhorava o seu desempenho como detetor de rádio.

¹¹ Para obter este ganho de tensão a resistência interna de placa do *audion* tinha que ser igualada através de um transformador adaptado da impedância de carga e obter a máxima transferência de potência. Na grelha a corrente era praticamente nula (nos amplificadores com grelha negativa) e não havia um problema de adaptação de impedâncias mas sim de procurar obter ganho de tensão.

Em agosto de 1912, Von Etten, assistente de De Forest, contacta a AT&T tentando convencer a empresa de que o *audion* tinha grande potencial de poder funcionar como repetidor telefónico nomeadamente nos cabos submarinos que eram usados para transmitir sinais de telegrafia. Deixou na AT&T um protótipo baseado no esquema anexo mas este protótipo só passado um ano foi aceite¹².

Nestas experiências Forest tinha de acoplar o circuito recetor do telefone ao circuito do microfone, como é normal, num sistema telefónico só com dois fios e, por vezes, isto gerava uma oscilação de audiofrequência inconveniente. De Forest verificou que o sinal acústico gerado poderia ser muito puro e pensou logo na hipótese de fazer um instrumento musical (tipo órgão eletrônico) usando o *audion*.



Em 1912 vários investigadores, nomeadamente Irwin Langmuir na General Electric (U.S.A.), e também Von Bronk e Mesissener na Telefunken (D), verificaram que um vácuo mais perfeito no *audion* era muito melhor para fazer amplificadores e osciladores. Todavia, o trabalho mais representativo nesta área dos amplificadores foi desenvolvido por Lowenstein, em 1912, que foi sujeito à patente U.S. 1231764

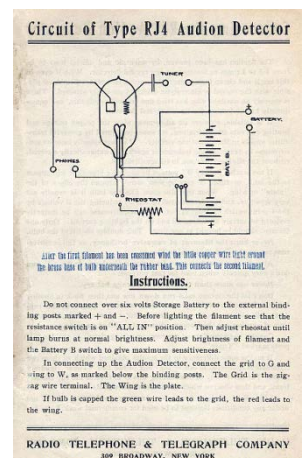
“Negative Bias Patent”. Lowenstein introduz, pela primeira vez, o funcionamento em classe A de amplificadores de áudio.

Os amplificadores e recetores de rádio que se seguiram passaram a usar as três baterias.

De Forest construiu vários amplificadores com *audions* usados em cadeia, essencialmente aplicados na amplificação de sinais telefónicos, mas também como osciladores em emissores de amplitude modulada, AM. De Forest relata a sua experiencia na saga do *audion* na [Popular Mechanics de fevereiro de 1916](#).



Em 1913 De Forest, funda a empresa “Radio Telephone & Telegraph Co”, produz o módulo de deteção de rádio RJ4 usando um audion que se poderia ligar a circuitos adicionais de sintonia externa para os amadores construírem rádios. Os resultados financeiros não são brilhantes e a empresa vai à falência em 1914. Forest vende a patente do audion por 50000 dólares mas fica a poder produzir *audions*, e funda, em 1914, a nova empresa “De Forest Radio Telephone & Telegraph”.



O conflito Marconi - Forest - Em novembro de 1914, a companhia Marconi (USA) pôs uma ação em tribunal contra Forest por considerar que as suas patentes do díodo de Fleming foram infringidas pelas patentes do *audion*. Forest contrapõe que as patentes de Fleming apesar de ser anterior também infringem as patentes do audion nas aplicações que não são de retificação de corrente alternada¹³.

O engenheiro Roy Weagant da Marconi, muito criativo e inteligente¹⁴, constrói um demonstrador com dois rádios exatamente iguais exceto o detetor: um recetor usando um díodo de Fleming e, no outro, um audion com grelha externa tal como tinha sido proposto por Lee de Forest na sua patente de 1907. A demonstração feita ao juiz do tribunal convence-o de que os princípios usados por de Forest já estavam contidos na patente de Fleming. [Veja aqui os detalhes deste conflito](#).

Em 1914 De Forest apresentou um radiotelefone baseado no audion e no microfone de carbono¹⁵.

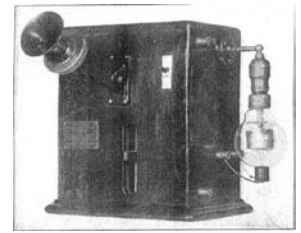
¹² A AT&T tinha assumido um compromisso de desenvolver tecnologia que permitisse transmitir sinais telefónicos pelos cabos submarinos transatlânticos; isto obrigaria a instalar regeneradores de sinal a cada 2 km de cabo e não havia tecnologia aceitável para fazer isto. Os cabos submarinos apenas transmitiam sinais telegráficos muito lentos devido à interferência inter-simbólica típica dos sistemas distribuídos com grande comprimento.

¹³ O *audion* começava a ter interesse para novas aplicações e Marconi era muito agressivo na defesa dos seus interesses.

¹⁴ Forest viria a contratar mais tarde, em 1922, Roy Weagant para desenvolver alguns dos seus rádios, de forma económica, de modo a tentar salvar a sua empresa da banca rota.

¹⁵ O *audion* funcionava como oscilador e o microfone de carbono era usado para a modulação AM.

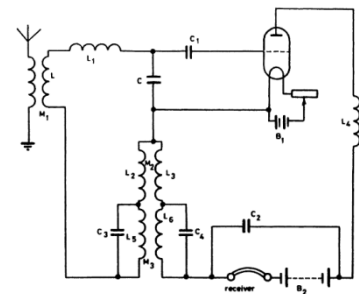
Depois de sucessivos desaires nos tribunais, De Forest vira-se, então, para a radiodifusão que tinha iniciado em 1907 com o seu radiotelefone e, em 1916, chega a conseguir ter audiências de vários milhares de ouvintes.



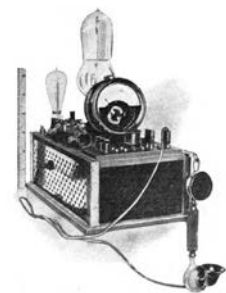
De Forest nunca teve explicações muito convincentes sobre o funcionamento do seu *audion* nas várias aplicações. Em 1915 Edwin Armstrong, e De Forest envolvem-se em discussões e [explicações contraditórias de como o audion funciona como detector de rádio AM](#). Armstrong recorre aqui à colaboração do Prof. Morecroft na produção de oscilogramas experimentais demonstrativos dos fenómenos envolvidos e das suas teorias.

Em 1915, a empresa Western Electric patenteia o díodo e o tríodo com cátodo indiretamente aquecido pelo filamento, mas este tipo de válvulas, por exigir mais energia das baterias, só viria a ter um grande desenvolvimento por volta de 1930 nos rádios alimentados a corrente alternada.

A descoberta da realimentação- A realimentação positiva, designada por regenerativa, permitia aumentar o ganho de amplificadores e até produzir oscilações. Edwin Armstrong usou este fenómeno para construir recetores regenerativos¹⁶, com um único tríodo, que patenteou, e que usavam realimentação positiva tanto em RF como no áudio. Um dos recetores construídos por Armstrong mereceu esta boa [avaliação de desempenho](#).



O tríodo como oscilador- Alexandre Meissener, em 1913, usou o seu tríodo para fazer um oscilador de RF e construiu um radiotelefone que transmitiu voz a cerca de 30 km de distância usando uma oscilação de 500 kHz, gerada pelo tríodo, modulada em amplitude (AM).



Evolução do tríodo- Forest fez experiências em França, em 1908, com o seu *audion* em encontros com o coronel Gustave Férrie, encarregado militar de seguir os desenvolvimentos da TSF “Telefonia Sem Fios”. Em 1914, Paul Pichon, desertor do exército francês, engenheiro na Telefunken, seguia para a Alemanha com as últimas novidades sobre o *audion*, trazidas dos USA, mas teve de aterrar em França devido ao início da 1ª guerra mundial. Teve a sorte de Gustave Férrie o “apadrinhar” e de este lhe ficar com as novidades tecnológicas americanas que vieram a possibilitar o desenvolvimento do tríodo francês TM “Tube Militaire”, em 1914.



O tríodo TM teve uma grande expansão na 1ª guerra mundial. Exemplos de utilização podem ser vistos no amplificador militar A4¹⁷ e no rádio MR5-1557-155M, para comunicações submarinas, existente no museu Faraday do IST.

Em 1916 a empresa Thomson Houston (GB) e a empresa Osram iniciam a produção do tríodo tipo R, versão do tubo TM, para usos militares nos equipamentos produzidos pela Marconi Co (GB). Estes tríodos são, hoje em dia, muito raros e desejados pelos colecionadores.



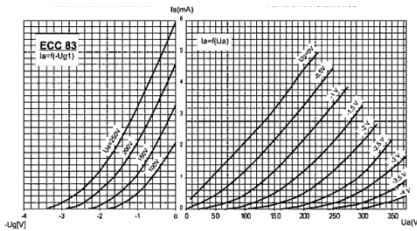
O fabricante francês, Ducretet, famoso pela excelência de construção dos seus aparelhos científicos, fabricou alguns rádios com os tríodos TM

¹⁶ Os recetores regenerativos e super regenerativos ainda se usam em aplicações não muito exigentes, dada a sua simplicidade e baixo consumo.

¹⁷ Foi produzido pela CGR (C.G.R.), Carpentier Gaiffe Rochefort, Cie. Générale Radiotélégraphique; Paris. Apesar de terem sido fabricados cerca de 100000 tríodos TM, hoje em dia são extremamente raros e caros.

excedentes da 1ª guerra mundial, entre os quais se encontra o magnífico rádio Piano M7¹⁸.

Tríodos mais recentes- Atualmente as válvulas mais preferidos para sinais fracos são a 12AX7 (ECC83) para



áudio e a 12AT7 (ECC81) para áudio e RF; ambos são duplos tríodos introduzidos em 1947, com elevado ganho ($\mu=100$)¹⁹. Foram produzidos por vários grandes fabricantes, mas atualmente só existem as válvulas antigas, pois os fabricantes tradicionais fecharam as linhas de produção. Há

fabricantes chineses, como a [Psvane](#), a fabricar réplicas, a explorar este mercado crescente da alta-fidelidade em áudio e também em RF. [Veja aqui um amplificador recente, com válvulas, em RF.](#)



Um dos tríodos replicados é o WE101D, um dos mais famosos tríodos da Western Electric, fabricado em 1914, e que pode ver no Museu Faraday. Este tríodo foi usado na construção dos primeiros amplificadores de áudio e altifalantes gigantes usados para “Public Adress”, pela primeira vez, desenvolvido pelo eng^o G. Weller dos Bell Telephone Systems, (ver figura), para o discurso do [presidente eleito Harding dos USA](#), em 1921.



O tríodo foi usado como base para [o primeiro circuito integrado](#), capaz de realizar um rádio, em 1926.

O som das válvulas - Quando comparamos as características de amplificadores somos, muitas vezes, levados pela análise simplista da resposta em frequência e pela distorção harmónica, medidas com sinais sinusoidais ou outros sinais periódicos. Normalmente os amplificadores a válvulas perdem neste tipo de comparações, relativamente aos amplificadores a transístores, mas podem ganhar na impressão subjetiva na audição de sons mais complexos como são os sinais de música. Poderemos voltar a este tema em futuras contribuições para a “DEEC News Letter”.

Referências

- Thomas Edison Patente U.S.A. [US307031](#), November 1883.
J. Fleming- Patente U.S.A. [US803684](#), November 1905.
J. Fleming “Principes of Electric Wave Telegraphy and Telephony” Longmans, Green and Co. 1ª edição em 1906, 2ª edição em 1910 e 3ª edição em 1916.
Lee de Forest “Wireless Telegraphy” U.S.A. 841386 (Agosto de 1906).
Lee de Forest “Device for Amplifying Feeble Electrical Currents” U.S.A. 841387 (outubro de 1906)
Lee de Forest “Space Telegraphy” U.S.A 879532 (Janeiro de 1907)
Edwin H. Armstrong “ Some Recent Developments in the audion receiver” *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, September, 1915, pages 215-238.
Lowenstein U.S.A. 1231764 (Abril de 1912).
S. Bennet “A History of Control Engineering, 1800-1930” Peter Peregrinus Ltd
Langmuir I. “ The effect of space charges and residual gases on thermionic currents in High Vacuum” *Physical Revue* 2, p.450, 1913.
Hugh G.J. Aitken “The Continuous Wave: Technology and American Radio, 1900-1932”
Sungook Hong - *Wireless: From Marconi's Black-box to the Audion*, ISBN: 0262082985 9780262082983
De Forest - *Popular Mechanics*, Feb. 1916.
Eric Wenaas “Radiola - The Golden Age of RCA, Sonoran Publishing, LLC,



Moisés Piedade

Professor do DEEC entre 1971 e 2012.

Trabalhos realizados em: Micro-ondas, RF, modelação de dispositivos semicondutores, Processamento Digital de Sinal, Processamento de Imagem e Vídeo, Energia sem Fios, Sistemas para redes de sensores, “Biochips” e Implantes biomédicos, Ensaios não destrutivos, etc.

Responsável por várias ações no DEEC: Reestruturação de vários cursos; instalação da Engenharia Eletrónica; criação de laboratórios e oficinas no IST Taguspark; [Estação CS5CEP](#); [ISTnanosat](#); [Elónica](#), [Museu Faraday](#), [Projeto SUBA](#), Envolvimento do DEEC [no Projeto FST](#), a partir do FST03, etc.

Hobbies: Fotografia, Mecânica, Acústica, Carpintaria, Serralharia, Radioamadorismo desde 1963- licença desde 1970; Coleção e restauro de objetos de eletrotécnica ([parte da coleção](#)).

¹⁸ Rádio extremamente raro e caro que pode, hoje em dia, atingir preços acima de 10000 euros.

¹⁹ μ é o produto da transcondutância pela resistência de placa e é o ganho máximo de tensão que é possível obter com a saída em vazio.