

Introdução

Michael Faraday sempre que apresentava as suas aulas / sessões de ciência às sextas feiras de tarde, na Royal Institution, acendia uma vela. Ver aqui, o texto [Faraday, a vela e a luz](#).

No Museu Faraday, no IST, nas visitas de grupo também costumamos acender uma vela, mas agora resolvemos criar as velas inteligentes designadas por Velas Faraday.

As velas Faraday foram concebidas para serem parte da escultura Quadro Faraday, que será constituída na presença de grupos visitantes.

As Velas Faraday são versões modificadas de velas chinesas que apareceram no mercado no final do ano de 2023. Está prevista a realização de várias velas inteligentes capazes de reagirem a vários estímulos: som ambiente, proximidade pessoas e a interagirem, sem fios, com dispositivos móveis.

As Velas Faraday assentam sobre um castiçal especial, também inteligente e podem dialogar entre si. Tanto as velas como o castiçal dispõem de altifalantes e de microfones. Podem reproduzir e adquirir áudio.

Mais do que um castiçal pode ser incluído num candelabro.

As velas mais avançadas têm a mesma arquitetura eletrónica do castiçal.

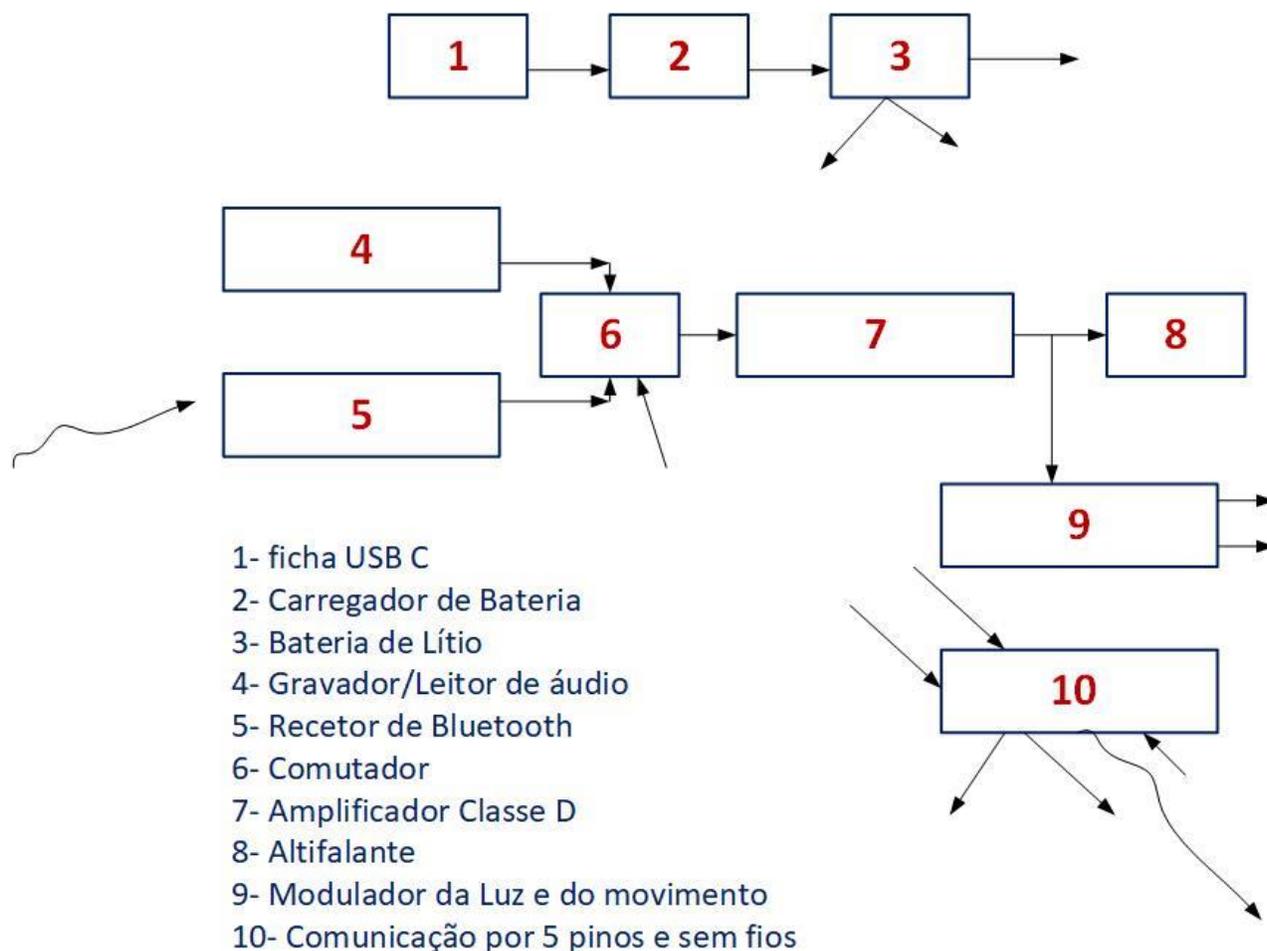


Fig. 1- Arquitetura das velas e do castiçal Faraday.

As velas chinesas

As velas chinesas estão dotadas de um mecanismo de oscilação do pavio e um iluminador deste por uma luz proveniente de um LED. Com estes mecanismos as velas chinesas fazem a simulação quase perfeita das velas reais, mas não produzem fumo.

Para realizar as Velas Faraday foi preciso investigar a constituição das velas chinesas e realizar um processo de engenharia inversa.

As velas chinesas são constituídas por um invólucro moldado em cera natural no qual é aplicada uma caixa de pilhas AAA e um mecanismo baseado num pêndulo eletromecânico e num LED. Este mecanismo provoca a oscilação mecânica de um pavio de plástico e ilumina-o, permitindo simular o pavio aceso de uma vela real.



Fig. 2- Velas chinesas com pavio oscilante.

Há dois tipos de velas. As velas grossas e as velas finas, Fig.2. Os dois tipos de velas dispõem de um interruptor de ligação na base da vela. As velas finas têm 22 mm de diâmetro e 245 mm de comprimento.

As velas grossas têm 75 mm de diâmetro e existem em comprimentos de 100 mm, 130 mm e 150 mm. Na Fig. 2 pode ver-se uma vela grossa de 130 mm de comprimento e uma vela fina. As velas finas são vendidas à unidade ou em grupos e as velas grossas são vendidas em grupos de 3 com comprimentos diferentes.

As velas grossas têm uma maior amplitude do movimento oscilatório do pavio e possuem controlo remoto, RC, do tipo ON/OFF da vela, bem como controlo da iluminação do pavio. As velas finas são ligadas pelo interruptor colocado na sua base e não tem controlo remoto.

As velas mais grossas têm comando remoto externo e são normalmente vendidas em grupos de três com os tamanhos acima referidos. O comando remoto funciona por raios infravermelhos seguindo o padrão de comunicação usual de comandos remotos de aparelhos de áudio, vídeo e TV. Os raios infravermelhos atravessam facilmente a cera do invólucro. O corpo da vela é translúcido e também simula a iluminação que se observa no corpo de uma vela real.



Fig. 3- [Vídeo da vela grossa.](#)

Na fig. 4 pode ver-se a constituição interna de uma vela fina. O mecanismo pendular do pavio, item 3 na Fig.4, é excitado pelo campo magnético de uma bobina onde em cada segundo é aplicado um impulso de corrente com a duração de 100 ms que gera um campo magnético que repele um pequeno íman cilíndrico colocado na base do pêndulo onde faz peso e origina a força de repulsão.

O pêndulo oscila mecanicamente em modo normal, mas em cada segundo da vela ligada recebe, da bobina, um impulso magnético repulsor. O impulso de corrente elétrica é proveniente de um circuito ASIC que aparenta ter o comportamento de um temporizador integrado 555 a funcionar no modo astável de funcionamento. O LED fica sempre aceso logo que a vela é ligada e a intensidade da luz é sempre constante.

O mecanismo de oscilação do pavio esta dentro de um invólucro de plástico que tem o diâmetro externo igual ao diâmetro interno do invólucro de cera (item 2 na Fig.4). Também o tubo de alumínio (item 1 na Fig.4), onde se introduzem as pilhas, tem o mesmo diâmetro externo.

As velas grossas têm o mecanismo de oscilação do pavio mais complicado. O circuito eletrónico de controlo tem um microprocessador que interpreta o código transmitido pelos raios IR provenientes do controlo remoto, RC, e que é recebido por um recetor de IR convencional.

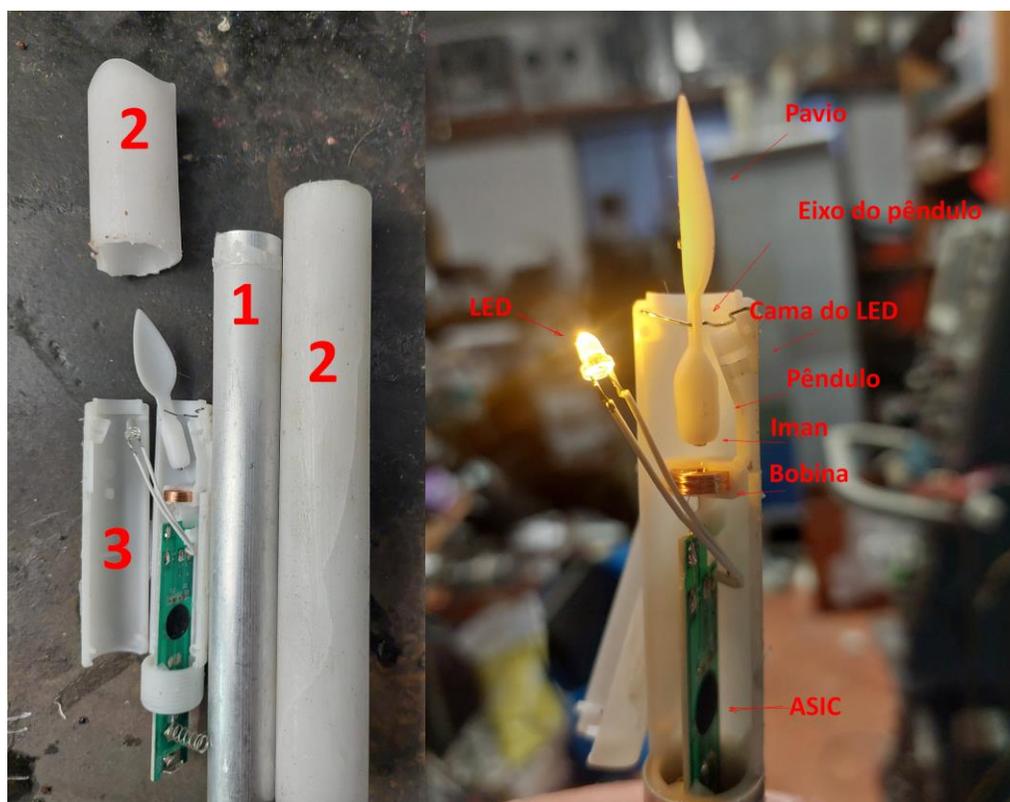


Fig. 4. - Vela fina – 1 – Invólucro de alumínio; 2- invólucro de cera, 3- mecanismo pendular do pavio.

Depois de a vela ser ligada, através do interruptor colocado na base e que interrompe a ligação das 3 pilhas de 1,5 V, a vela fica operacional no modo de oscilação mecânica e luz máxima. Pode, agora, receber comandos remotos.

A oscilação do pêndulo mecânico é alterada em cada segundo por um impulso de corrente na bobina com a duração de 0,1 s.

O comando remoto, Fig. 6, tem as funções ON e OFF e funções de temporização de 2 h, 4 h, 6 h e 8 h, além das funções descritas de seguida.

Os comandos de Modo “Candle”, “Light” e “Dim” atuam sobre a intensidade de corrente e, conseqüentemente sobre a intensidade da luz produzida. No

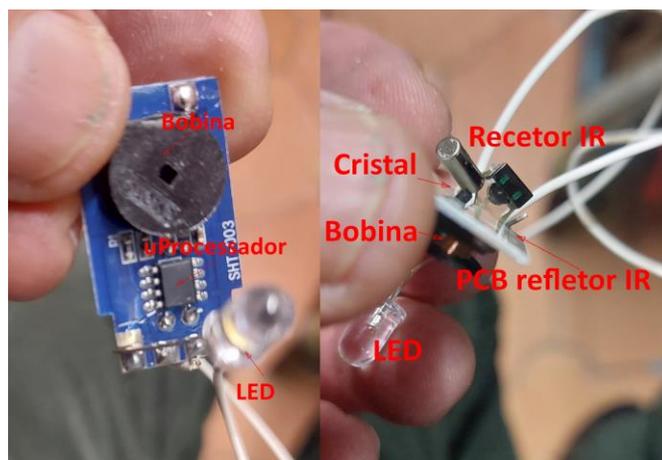


Fig. 5 – Mecanismo da vela grossa.

modo "Light" o LED fica permanentemente ligado (luz de máxima intensidade) e, no modo "Candle", a luz do LED é pulsada em cada 10 ms ficando no estado ON e ficando 5 ms no estado OFF pelo que se vê a luz a pulsar.

O modo "DIM" controla por modulação de largura de impulso, PWM, a luz como se fosse no modo "Candle" mas desde um valor muito baixo até ao valor máximo.

Com os 4,5 V das pilhas a corrente no LED chega a ser de 50 mA. Com 3,7 V de tensão de alimentação, valor que nos interessa para se poder usar uma bateria de lítio, a vela grossa consome 35 mA quando está ON e 0,25 mA quando está OFF (através do RC). O consumo do microprocessador e do recetor de IV é de 1 mA. O LED consome 34 mA.

As velas Faraday

Foram realizados dois suportes de madeira para as velas finas e grossas, afim de as acoplar ao novo castiçal, também fabricado em madeira. O suporte das velas tem uma anilha em ferro que permite a atração para a tampa do castiçal por dois imãs.

O castiçal pode ser usado quer com as velas finas quer com as velas grossas, desde que se use o suporte adequado da vela.

Tanto o castiçal como as velas permitem estabelecer caminhos acústicos separados para pequenos altifalantes colocados quer no suporte da vela quer no castiçal.

Tanto a vela grossa como o castiçal têm condutas acústicas que permitem fazer várias experiências acústicas a partir do som produzido por cada um dos altifalantes. A estrutura de peças amovíveis quer da vela quer do castiçal permitem ir modificando o caminho acústico e fazer experiências acústicas diversas observando experimentalmente os efeitos observados.

Os suportes das velas dispõem de 5 pernos condutores com 3 mm de diâmetro, do tipo dos usados nas válvulas eletrónicas. Estes pernos fazem a ligação elétrica entre o suporte da vela e o castiçal, permitindo a comunicação entre eles.

A partir da vela grossa com 100 mm de comprimento foi criada uma vela mais curta com apenas 70 mm de comprimento.

Foi criada uma gola de madeira "apanha cera", amovível, que também tem o objetivo de difundir o som proveniente da parte de cima do castiçal, ver Fig. 8.



Fig. 6 -RC da vela grossa.



Fig. 7- Suporte das velas e candelabro.

O suporte da vela grossa

O suporte da vela grossa tem implantado na base um interruptor magnético inversor que será atuado pela tampa do castiçal onde estão colados dois pequenos magnetos de neodímio que têm, também, a função de fixar o suporte da vela sobre o castiçal. É este interruptor magnético, conjuntamente com outro colocado ao lado do pavio, que ligam automaticamente a parte eletrónica da vela grossa. O pavio está protegido por uma carapuça que só depois de retirada permite atuar o interruptor magnético e “acender” a vela.

Por cima do interruptor magnético da base está colocado um pequeno altifalante sobre uma placa que permite separar o caminho acústico do som produzido pela parte da frente do cone do altifalante do som produzido pela parte de trás. O som produzido pela parte da frente do altifalante seguirá pelo caminho acústico interior do castiçal enquanto o som traseiro do altifalante seguirá pelo caminho acústico dentro da vela.

Existe uma segunda placa circular dentro do suporte da vela grossa onde estão implantados os circuitos eletrónicos da vela, com exceção dos circuitos eletrónicos associados ao controlo do pavio que estão agarrados ao invólucro do pavio.

Na Fig. 10 pode ver-se o módulo da bateria de lítio e respetivo carregador implantado numa placa vertical fixada na referida segunda placa circular, dotada também de caminho acústico para a parte de cima da vela.

Existe outra placa vertical situada na posição oposta que contém o amplificador de áudio, em classe D, e o transmissor “Bluetooth”, BT de comunicação com o exterior da vela.

A bateria de lítio tem a forma paralelepípedica e funciona entre 3,7 V e 4,2 V. Dispõe de circuitos de proteção contra curto circuito, através da limitação da corrente debitada (2 A) e proteção de tensão baixa, situação em que se desliga do exterior. O circuito de carregamento da bateria segue o protocolo normal de carregamento de baterias de lítio, primeiro com carga em corrente constante e, depois, com carga em tensão controlada. O carregador da bateria obtém a energia elétrica a partir de uma fonte externa através de um conector USB C implantado no suporte da vela.

O mecanismo de controlo do pavio

Projetou-se um circuito eletrónico que se adicionou ao mecanismo de controlo do pavio mantendo todas as funcionalidades do comando remoto da vela. Nesta primeira fase de controlo da vela apenas se introduziram modificações no controlo da luz produzida pelo pavio que ficou



Fig. 8- Vela grossa e curta no suporte, com gola, pernos de ligação e entrada USB C.



Fig. 9 – Detalhe do suporte da vela grossa. Detalhe de fixação do altifalante e da ligação dos 5 pernos.

dependente das variações de baixa frequência do sinal de saída do amplificador de classe E que excita o altifalante embebido.

O modulador de intensidade da luz do LED ficou agarrado ao mecanismo de controlo do pavio. Basicamente introduziu-se o circuito representado na Fig. 11 dentro da área a traço interrompido.

O sinal de impulsos diferenciais de alta frequência (cerca de 200 kHz) aplicados ao altifalante contém o áudio modulado em PDM, “*Pulse Density Modulation*” que tem um valor médio de metade da tensão da bateria (VDD). O sinal de alta frequência é filtrado e o sinal de áudio resultante é submetido ao detetor de envolvente constituído por R1, D1, C1 e R2, com constantes de tempo de atuação e desativação adequadas. O sinal da envolvente é aplicado a um amplificador de classe A constituído por R3, R4, R5, Q1 e Q2. R6 limita a corrente máxima no LED, controlada pelo sinal PWM vindo do transístor CMOS canal N do controlador da luz do pavio e que funciona no modo ON / OFF. Assim, a corrente no LED passa a ser controlada proporcionalmente à envolvente do sinal de áudio e por VDD/2.

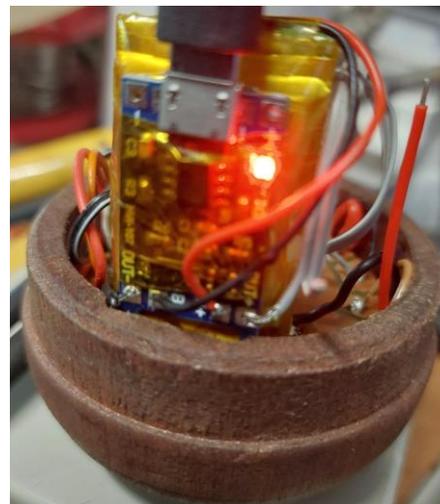


Fig. 10 – Módulo da bateria e respetivos circuitos de proteção e de carregamento.

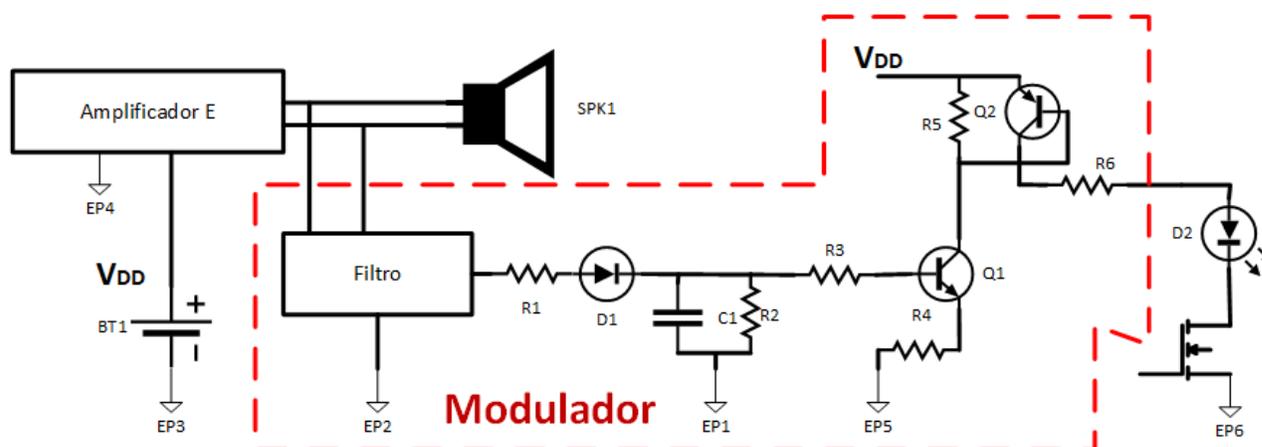


Fig. 11- Representação do circuito de modulação da luz do pavio.

O castiçal

O castiçal é constituído por várias peças, mas as peças básicas são as do invólucro representadas na Fig. 12. Cada uma destas peças é constituída por duas peças coladas. A parte 2 é reversível, isto é, pode ser colocada sobre a parte 1, na posição da Fig. 12 ou na posição inversa na vertical.

A parte eletrónica do castiçal está dentro do módulo representado na Fig. 13 construído dentro de um tubo de PVC que encaixa na peça 2 do castiçal qualquer que seja a orientação escolhida para esta peça.

Na tampa desta peça está uma placa onde estão instalados os dois ímãs de neodímio referidos acima e que servem para atuar os circuitos da vela grossa. Por baixo desta tampa estão os cinco contactos que recebem a informação transmitida/recebida pelos pernos do suporte da vela.

Na parte inferior deste módulo está instalado o altifalante do castiçal dotado do caminho acústico superior que termina nos orifícios mais externos da tampa. O caminho acústico proveniente do suporte da vela continua por dentro do castiçal separado do caminho acústico do altifalante.

A arquitetura da eletrónica do castiçal é semelhante à usada no suporte da vela, com exceção dos mecanismos de controlo de iluminação da vela, mas tem espaço para um módulo de gravação de sinais no seu interior. Esses sinais podem ser aplicados ao altifalante do castiçal ou, até, ser transmitidos pelos pernos para o suporte da vela onde serão reproduzidos pelo outro altifalante.

Os dois caminhos acústicos do castiçal e do suporte da vela terminam numa região acústica de compressão do som que será reproduzido por uma corneta amovível colocada na sua extremidade inferior.

A corneta acústica

O difusor de som da parte inferior dos altifalantes é constituído por uma corneta de madeira com secção retangular e com expansão exponencial desde o orifício da entrada na corneta (garganta) até à boca de saída. A boca de saída tem cerca de 250 mm de largura e 125 mm de altura.

A corneta é alimentada por um compressor acústico também realizado em madeira. A câmara de compressão acústica adapta a baixa impedância acústica da saída do suporte do castiçal, item 1 da Fig. 12, à alta impedância de entrada da corneta acústica de modo a excitá-la convenientemente.



Fig. 12- Peças básicas do corpo do cálice.

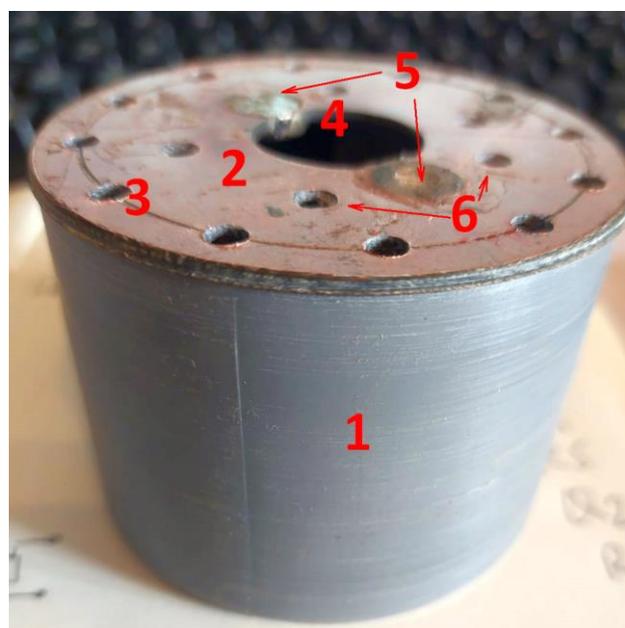


Fig. 13- Interior amovível do cálice.

- 1- Corpo; 2- tampa; 3- furos de saída do som; 4- orifício de passagem do som do suporte da vela; 5- ímãs de fixação do suporte da vela; 6- orifícios de entrada dos pernos de ligação com o suporte da vela.

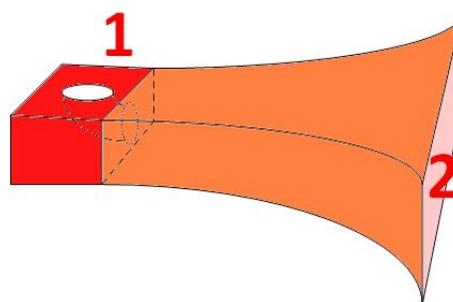


Fig. 14 – Corneta acústica.

O som entra na corneta com polarização circular mas na corneta existe uma secção cónica que progressivamente induz polarização retangular.

O efeito de amplificação acústica proporcionado pela corneta deriva da adaptação acústica progressiva da sua alta impedância de entrada à impedância acústica do ar à pressão ambiente. O som proveniente do compressor acústico é feito na entrada (1, na Fig. 14) designada por garganta e a saída do som é feita pela boca (2 na Fig.14).

A corneta é feita de madeira numa estrutura compósita em que se usam duas lâminas de madeira de cerejeira com 0,8 mm de espessura e uma camada interior de manta espessa de fibra de vidro com cerca de 300 gramas por m². As três lâminas foram coladas com resina de poliéster, ver Fig. 15, proporcionando leveza, rigidez e resistência à corneta. A espessura total de cada lâmina é de 2,5 mm a 3 mm. As quatro peças da estrutura compósita foram moldadas em moldes de madeira dotados da curvatura exponencial necessária, ver Fig. 16.

Na Fig.17 pode ver-se a corneta já na fase quase final. Foi necessário dotar a boca da corneta de um bordo em alumínio para garantir a estabilidade dimensional da boca pois a estrutura compósita de madeira era muito frágil e deformava-se com facilidade.

A corneta difunde o som de forma que a 2 a 3 metros de distância a região de cobertura tem uma secção transversal quase elíptica com o eixo maior na horizontal e o eixo menor na vertical.

O porto acústico, constituído por um tubo circular com 20 mm de diâmetro, de acesso à garganta da corneta, tem uma inclinação de modo que quando a corneta é inserida na câmara de compressão a boca da corneta fica ligeiramente inclinada para cima de modo ao som atingir a altura da cabeça dos ouvintes.

Câmara de compressão acústica

A câmara de compressão acústica adapta a impedância acústica da saída do suporte do castiçal, item 1 da Fig. 12, à garganta da corneta acústica. Esta câmara baseia-se numa secção cónica cuja secção transversal circular vai progressivamente diminuindo de diâmetro aumentando, assim, a pressão acústica e a impedância acústica necessárias para excitar a corneta.



Fig. 15 - Lâminas curvas de madeira compósita.

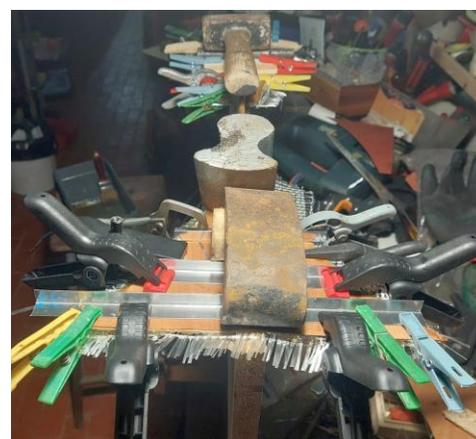


Fig. 16 - Moldagem das lâminas da madeira compósita.



Fig. 17 - Corneta quase pronta e câmara de compressão

Na Fig. 18 pode ver-se a coleção de acessórios amovíveis que foram desenvolvidos para o castiçal. Apresenta-se também o módulo eletrónico da vela Faraday grossa.



Fig. 18 – Peças do castiçal da vela grossa Faraday.

- 1- Base da vela Grossa com módulo eletrónico; 2- Gola da base da vela grossa; 3- Módulo interior do castiçal; 4- Pele do castiçal; 5- Adaptador ao suporte da vela Grossa no Quadro Faraday; 6- Câmara de compressão; 7- Corneta acústica.

As experiências acústicas

.....

Referencias:

[Exemplo de uma visita realizada](#)

[Quadro Faraday](#)

Vídeo sobre efeitos acústicos na vela (em construção)

O Boné Faraday (em construção)