

Disclaimer: *These notes have not been subjected to the usual scrutiny reserved for formal publications. They may be distributed outside this class only with the permission of the Instructor. If you find any errors, I would be most grateful if you reported them to manuel.pita@ulusofona.pt*

Redes neuronais: máquinas feitas de ligações

Warren McCulloch e Walter Pitts pensaram sobre ‘inteligência artificial’ de uma forma que é muito diferente da abordagem de manipulação de símbolos usada por Alan Turing. Com formação nas neuro-ciências, McCulloch e Pitts estavam alinhados com a perspectiva que tenta definir a inteligência através de perceber como funciona o cérebro (e o comportamento) humano. Portanto o objectivo era criar máquinas que (a) funcionassem de maneiras semelhantes aos cérebros biológicos e (b) que por serem artificiais nos permitissem estudar como é que este tipo de máquina pode representar, fazer inferências (raciocínio) e aprender (os pilares dos quais falamos na aula anterior). A Figura 2.1 mostra as componentes de um neurónio.

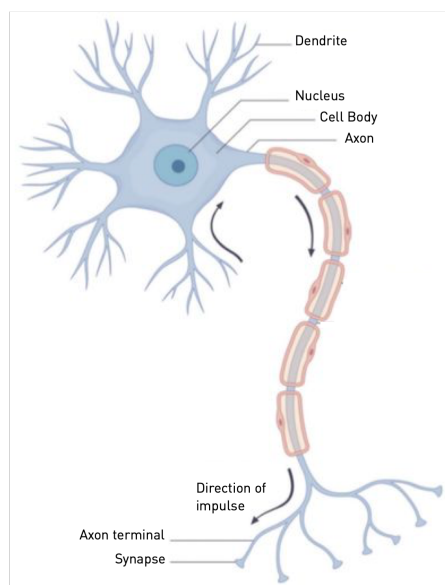


Figure 2.1: Diagrama simplificado das partes constituintes de um neurónio.

De forma muito simplificada, podemos dizer que os neurónios têm sensores, chamados *dendrites*, por meio dos quais podem receber sinais provenientes do exterior (ou de outros neurónios), codificando os mesmos em forma de impulsos bio-eléctricos. Os neurónios têm um único canal de saída chamado *axónio*, cuja única

função é o emitir sinais bio-eléctricos. Os axónios podem-se ramificar em muitos fios terminais. Quando o terminal de um axónio toca a dendrite e do mesmo, ou mais comumente de outro neurónio, poderemos então ter o fenómeno de comunicação chamado *sinapse*. Este processo passa impulsos bio-eléctricos para o núcleo da célula do neurónio receptor. O núcleo da célula funciona como um capacitor eléctrico com limite de saturação. Quando a saturação de impulsos satura o núcleo do neurónio, atingindo o seu limiar, o neurónio produz um impulso de saída emitido através do axónio. Um terminal de um axónio (A) pode, também, interagir com a com o tronco central do próprio axónio A, ou mais comumente, com o axónio de outro neurónio (B). Neste caso o que acontece é que, independentemente da saturação no neurónio (B), a saída do impulso eléctrico será inibida momentaneamente por esta interacção. Isto é, essencialmente, o funcionamento básico dos cérebros reais. Não há símbolos explícitos, nem programador, nem estados internos explícitos que possamos manipular. É por isto que entender o funcionamento do cérebro tem sido, e continua a ser, um grande desafio.

McCulloch e Pitts inspiraram-se em neurónios reais para construir uma máquina idealizada que pudesse implementar a essência destes mecanismos básicos dos cérebros, embora de uma forma muito simplificada. As máquinas de McCulloch e Pitts são feitas de neurónios artificiais muito simples. Um neurónio artificial de McCulloch e Pitts tem um limiar de saturação denotado por l (um número inteiro). Um neurónio artificial permite a entrada de fibras que podem ser excitatórias (terminações representadas por um círculo preto preenchido) ou inibitórias (terminações representadas por um círculo branco aberto). As fibras sempre conectam (1) o meio externo com um neurónio; (2) um neurónio a outro neurónio ou (3) um neurónio a si mesmo. As fibras dendriticas podem-se ramificar ou se juntar em fibras individuais na entrada de um neurónio. O axónio pode-se ramificar para assim poder atingir diversos neurónios. As fibras excitatórias contribuem para atingir o limiar de saturação de um neurónio. No entanto, uma única conexão inibitória activa bloqueará sempre a actividade de saída do neurónio. Os detalhes sobre a dinâmica das redes neuronais de McCulloch e Pitts são explicados a seguir. A Figura 2.2 mostra uma representação do neurónio básico de McCulloch e Pitts, e a Figura 2.3 mostra exemplos de maneiras correctas e incorrectas de incluir fibras excitatórias e inibitórias.

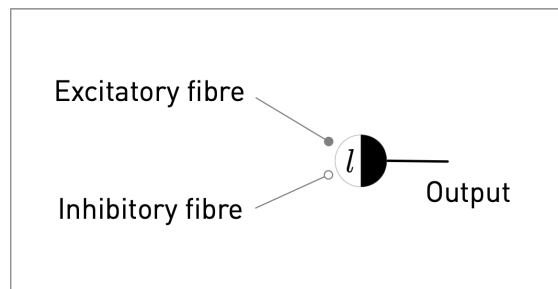


Figure 2.2: O neurónio de McCulloch e Pitts.

Uma vez que a arquitectura da rede é definida, a dinâmica ocorre em intervalos de tempo discretos. Isto é, os impulsos de saída na rede não acontecem continuamente, mas em intervalos de tempo, denotados por t . Portanto, num determinado intervalo de tempo t , a rede está ‘congelada’. Cada neurónio verifica se a actividade nas suas fibras de entrada atinge o limiar de saturação. Se a soma das fibras de entrada com impulsos activos for igual ou maior que o limiar de saturação do neurónio, l , então esse neurónio emitirá um impulso eléctrico pela sua fibra de saída durante o próximo intervalo, $t + 1$. No entanto, e isto é importante, qualquer neurónio que tenha pelo menos uma fibra inibitória activa durante o intervalo t não ‘dispara’ em $t + 1$, sem importar quantas fibras excitatórias estavam activas em t . A actividade de qualquer fibra inibitória em t num neurónio sempre bloqueia o seu impulso de saída em $t + 1$.

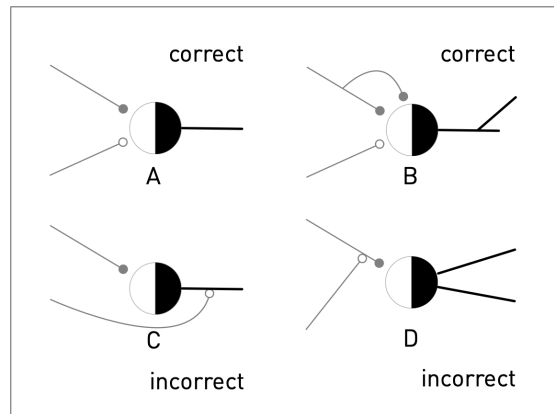


Figure 2.3: **Inclusões correctas e incorrectas de fibras nos neurónios de McCulloch e Pitts.**

Esta arquitectura extremamente simples permite a implementação de, por exemplo, portas lógicas e e máquinas que atrasam a chegada de um sinal eléctrico a sua saída, tal como mostrado na Figura 2.4.

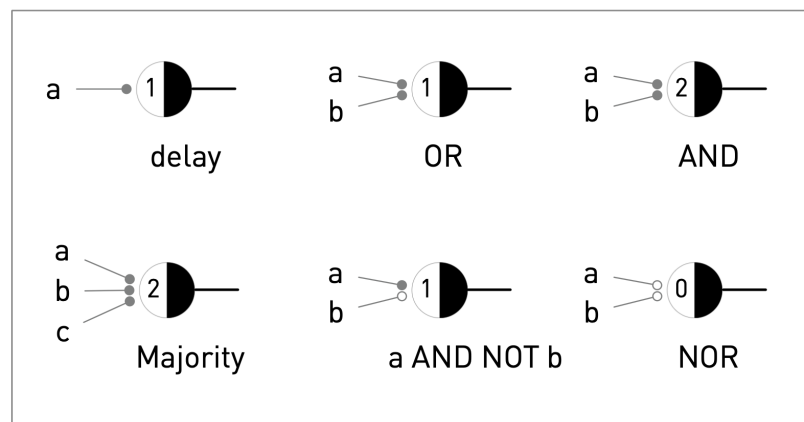


Figure 2.4: **Máquinas básicas e portas lógicas com neurónios de McCulloch e Pitts.**

Estas implementações de funções lógicas com redes neuronais criaram muito entusiasmo o qual deu origem a um campo de investigação científica chamado **Cibernética**. Os avanços científicos criados por investigadores em Cibernética e IA produziram, já perto de quarenta anos atrás, o que é conhecido hoje como *Deep Learning*. Durante a aula a qual corresponde este guia, discutimos as implementações de redes neuronais básicas que implementam dois mecanismos importantes para o processamento de informação: **controlo** e **memória**. Para fixar estes novos conhecimentos, para o conceito de controlo, analise a Figura 2.5 e explique que mecanismos de controlo são implementados nos exemplos (A, B e D). Em relação ao mecanismo principal de implementação de memória, falamos sobre **loops** e de **feedback**. Analise rede da Figura 2.5C e explique o mecanismo de memória implementado.

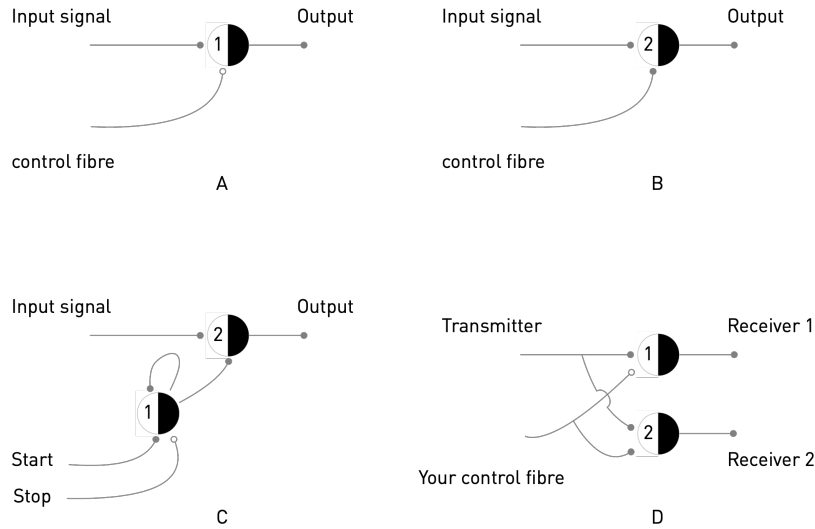


Figure 2.5: Exemplos de controlo e memória em máquinas neuronais simples.

Trabalho prático

O mecanismo básico de uma rede neuronal é o implementado pela saturação de um neurónio num momento t , o qual, na ausência de inibidores, faz com que o neurónio “dispare” em $t + 1$ enviando um pulso através do axónio. Outro mecanismo tem a ver com como podemos implementar controlo de sinais que passam pela rede neuronal. A Figura 2.6 ilustra este exemplo. Aqui usamos uma fibra de inibição para bloquear a saída quando queremos bloqueá-la. Isso significa que se a fibra de entrada estiver constantemente a pulsar, e queremos interromper seu fluxo, tudo o que precisamos fazer é enviar pulsos através da fibra de controlo, e isso interromperá que o neurónio emita pulsos de saída, ainda quando o seu núcleo estiver saturado. É importante recordar sempre que o processo de entrada e saturação acontecem no momento t e a saída só acontece em $t + 1$.

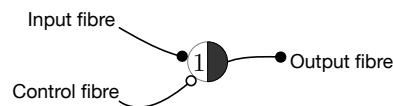
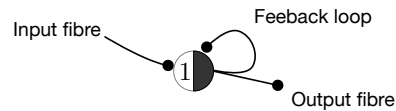


Figure 2.6: Controlo neuronal com inibição.

O outro mecanismo essencial para o funcionamento de uma rede neuronal é o feedback loop, o qual implementa a capacidade de memória. A Figura 2.5 corresponde com a implementação mais básica deste mecanismo. A partir de algum momento t no qual a fibra de entrada tinha um pulso, o neurónio continuará a emitir pulso de saída indefinidamente porque a própria saída tem uma ramificação que volta a saturar o neurónio.

Figure 2.7: **Controlo neuronal com inibição.**

Problema 1: Controlo

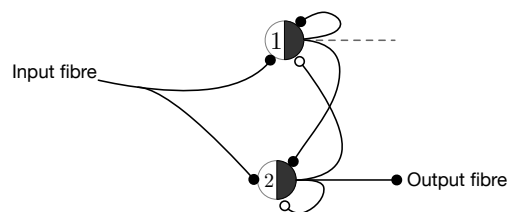
Considere a situação em que temos uma fibra ligada ao meio exterior a qual em algum momento poderá ter um pulso. Imagine que queremos implementar um mecanismo que nos permita controlar para onde vai esse pulso, e temos dois receptores R_1 e R_2 . Desenhe uma arquitetura de McCulloch e Pitts que permita implementar este mecanismo de controlo. Dica: o controlo terá de ser implementado através duma fibra específica para essa função, de forma que quando a fibra de controlo não estiver a pulsar, a entrada vai para o neurónio R_1 mas quando estiver a pulsar, a entrada vai para o neurónio R_2 .

Problema 2: Feedback loops

Considere o mecanismo de controlo da Figura 2.6. Imagine que na saída temos uma lâmpada que emitirá luz quando a fibra de saída do neurónio estiver a pulsar. Imagine também que a entrada é uma fonte de electricidade. Implemente uma rede neuronal que permita abrir ou fechar a luz pulsando só uma vez no mecanismo de controlo. Dica: para que o acender e desligar funcionem com um único pulso, será necessário memorizar.

Desafio

Um problema interessante no contexto de aprender os conceitos básicos de redes neuronais é o *escalador binário*. Um escalador binário é uma rede neuronal que produz um pulso de saída cada vez que entram dois pulsos de entrada, sem importar se os pulsos estão todos juntos ou espaçados com zeros entre eles. Em muitos computadores, os escaladores binários são usados para contar, bem como para outras operações aritméticas. Considere a implementação de um escalador binário na Figura 2.8. Analise-o e responda (a) funciona? Se sim, (b) como funciona e como garante que sempre funciona? Se não funcionar, (b) porque não? Consegue descobrir o que precisa ser feito para consertá-lo? Dica: não esquecer que um neurónio que satura em t dispara só em $t + 1$.

Figure 2.8: **Controlo neuronal com inibição.**