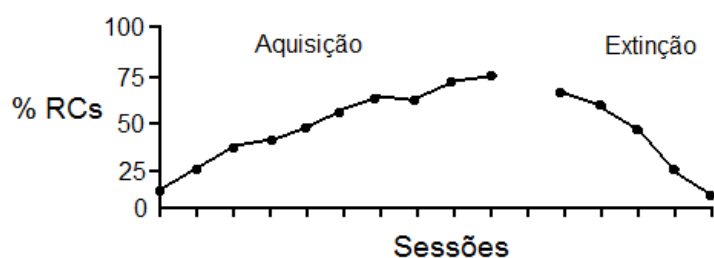
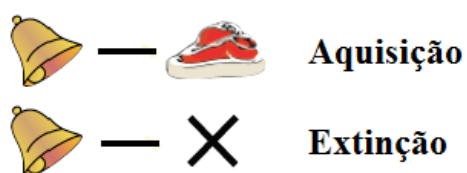
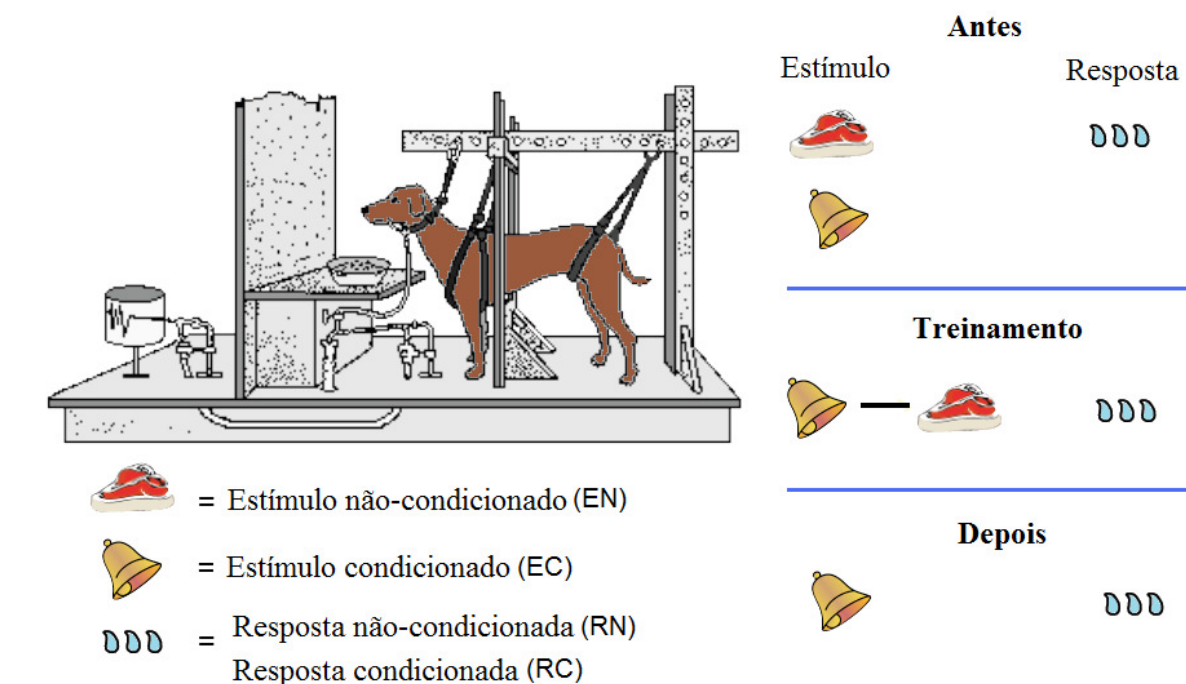


## Modelos Conexionistas para Aprendizagem Associativa

Baseado no artigo de revisão de Vogel, Castro e Saavedra, *Brain Res. Bull.*, 63:173-202, 2004.

O principal paradigma experimental para o estudo dos mecanismos de aprendizagem é o chamado condicionamento clássico ou pavloviano. Nesse paradigma, um estímulo neutro do ponto de vista comportamental, o estímulo condicionado (EC ou CS, da sigla em inglês para *conditioned stimulus*), é pareado repetidamente com um estímulo biologicamente significativo, o estímulo incondicionado (EI ou US, da sigla em inglês para *unconditioned stimulus*). Um exemplo de CS é um tom sonoro e um exemplo de US é uma porção de comida. Após o pareamento repetido, o CS passa a eliciar uma resposta observável, a chamada resposta condicionada (RC ou CR, da sigla em inglês para *conditioned response*), que é similar à resposta para o US (chamada de resposta não-condicionada, RN ou UR da sigla em inglês para *unconditioned response*). Um exemplo de UR é a salivação do animal ao ver a comida (veja a figura abaixo).



A partir dos anos 30 do século passado, modelos quantitativos para condicionamento, expressos em linguagem matemática, têm sido propostos, acompanhando a evolução dos estudos experimentais e teóricos sobre aprendizagem associativa.

Considera-se que a primeira teoria quantitativa para aprendizagem associativa foi desenvolvida por Hull em uma série de artigos e livros publicados entre 1939 e 1952 (veja a aula 2). O modelo matemático elaborado por Hull está centrado nas associações entre estímulos e respostas (CS – CR) e na idéia de que aprendizagem é fruto de relações entre estímulos e motivações (*drives*).

Segundo Hull, a associação entre um estímulo (CS) e uma resposta (CR) é formada quando a ocorrência da resposta na presença do estímulo é seguida por uma “redução na motivação” (*drive reduction*) que, no caso do condicionamento pavloviano, é provocada pelo reforço fornecido pelo US.

Na teoria de Hull, um CS produz um traço de memória de curta duração, de intensidade variável com o tempo, que ativa associações excitatórias ou inibitórias com múltiplas respostas. As associações excitatórias seguidas pela apresentação de um US satisfatório são fortificadas, enquanto que as outras não. Para Hull (1950), qualquer traço de memória de um CS pode se associar com a CR, independentemente das associações desta com outros estímulos condicionados.

O modelo teórico de Hull envolve muitas equações, mas uma de particular interesse é a que diz respeito à associação excitatória entre um CS e um CR. Segundo Hull, uma *força de associação* excitatória se estabelece entre um CS e um CR ao longo de ensaios reforçados repetidos. A variação da força de associação entre o CR e um dado CS (indicado por  $CS_i$  aqui) a cada ensaio reforçado é expressa pela equação:

$$\Delta V_i = \alpha(M - V_i). \quad (1)$$

Nesta equação,  $V_i$  é a força da associação do  $CS_i$  com o CR,  $M$  é o máximo valor que uma força de associação com o CR pode atingir e  $\alpha$  é um parâmetro que determina a taxa de variação de  $V_i$  (chamado de “taxa de aprendizado”).

Segundo a equação (1), a variação em  $V_i$  torna-se cada vez menor à medida que o número de ensaios reforçados aumenta (pois  $V_i$  se aproxima de  $M$ , reduzindo o tamanho do incremento). Alguns autores chamam esse tipo de comportamento de relação de “aceleração negativa” entre  $V_i$  e o número de repetições reforçadas.

Uma hipótese subjacente à equação (1) é a de que qualquer estímulo que tenha uma representação interna ativa no momento da ocorrência do reforço fornecido pelo US sofre um incremento na sua força de associação com o CR, independentemente dos outros estímulos presentes no mesmo momento. Esta hipótese foi chamada de “hipótese da continuidade” na época de Hull.

Vários resultados experimentais sobre condicionamento envolvendo a apresentação de mais de um CS realizados entre as décadas de 60 e 70 do século passado demonstram que a hipótese da continuidade não é correta. Esses experimentos indicam que a associação de um CS com o CR *depende* das associações dos outros CSs com o CR.

Exemplos desses experimentos são os feitos pelo psicólogo estadunidense Leon Kamin (1927 – ) entre 1968 e 1969. Esses experimentos demonstram que uma associação não é formada com um dado CS se outro CS for mais informativo, um efeito que foi chamado de “bloqueio”.

Por exemplo, em um desses experimentos um grupo de animais passou por 16 ensaios em que um CS (ruído) era seguido pelo US (choque) enquanto que os animais do grupo controle passaram por 8 ensaios em que recebiam dois CSs (ruído e luz) antes do choque.

Posteriormente, os animais do primeiro grupo foram submetidos a uma situação igual à do grupo controle em que ruído e luz foram apresentados antes do choque por 8 ensaios.

Após esses ensaios, Kamin submeteu os animais dos dois grupos a testes em que eles eram submetidos separadamente a luz ou a ruído. Os resultados de Kamin mostraram que os animais do grupo controle apresentavam a RC (redução de atividade, indicativa de condicionamento de medo) tanto para o ruído como para a luz, mas os animais do primeiro grupo apresentavam a RC apenas para o ruído e não para a luz.

A interpretação de Kamin para esse experimento é a de que o ruído já havia sido estabelecido como um previsor confiável do choque para os animais do primeiro grupo, de maneira que a informação fornecida pela luz na segunda parte do experimento era redundante. Portanto, apenas o ruído estabeleceu uma associação forte com o CR, mas não a luz. Esse experimento contraria a hipótese da continuidade porque os dois grupos de animais foram submetidos exatamente ao mesmo número de pareamentos da luz (8) com o choque.

O bloqueio é um caso típico do que se chama de fenômeno de “competição entre estímulos”, pois a associação de um dado CS com o US depende do grau com que o CS prevê a ocorrência do US e isso parece depender do grau com que outros CSs prevêem o mesmo US.

A teoria para condicionamento pavloviano de maior sucesso até o momento, capaz de explicar o fenômeno de bloqueio e muitos outros fenômenos de competição entre estímulos, foi a proposta pelos psicólogos estadunidenses Robert Rescorla (1940 – ) e Allan Wagner (1934 – ) em 1972 (veja a entrada sobre o modelo de Rescorla-Wagner na Scholarpedia, escrito pelo próprio Rescorla, em [http://www.scholarpedia.org/article/Rescorla-Wagner\\_model](http://www.scholarpedia.org/article/Rescorla-Wagner_model)).

Segundo Rescorla e Wagner (1972):

*Os organismos só aprendem quando os eventos violam as suas expectativas. Quando um complexo de estímulos ocorre, certas expectativas são construídas sobre os eventos que se seguem a ele; as expectativas iniciadas pelo complexo e seus estímulos componentes só são modificadas quando os eventos consequentes não concordam com a expectativa composta.*

O modelo de Rescorla-Wagner possui três conceitos quantitativos básicos:

1. O primeiro é a “força de associação”,  $V_i$ , entre o  $CS_i$  e o US. Esta grandeza controla o valor do condicionamento exibido pelo  $CS_i$ .
2. O segundo é o nível máximo,  $\lambda$ , que a força de associação com o US pode atingir. O modelo considera que  $\lambda$  depende do US, de maneira que USs mais fortes podem sustentar associações mais fortes.
3. O terceiro é a taxa de aprendizagem,  $\alpha_i$ , que determina a rapidez com que a força de associação  $V_i$  entre o  $CS_i$  e o US atinge o valor máximo  $\lambda$ . O parâmetro  $\alpha_i$  é chamado de *associabilidade* ou *saliência* do  $CS_i$ .

Segundo o modelo de Rescorla-Wagner, a cada repetição de um ensaio de associação com um US em que mais de um CS podem estar presentes, a força de associação do  $CS_i$  com o US muda conforme a regra:

$$\Delta V_i = \alpha_i \left( \lambda - \sum_{j \in \{\text{CSs presentes}\}} V_j \right). \quad (2)$$

A expressão acima é chamada de **regra de aprendizado de Rescorla-Wagner**. Ela diz que a força de associação entre o  $CS_i$  e o US aumenta (a uma taxa  $\alpha_i$ ) quando a soma total das forças de associação dos estímulos presentes no ensaio for menor que o nível máximo  $\lambda$  e que ela diminui (a uma taxa  $\alpha_i$ ) quando a soma total das forças de associação dos estímulos presentes no ensaio for maior que o nível máximo  $\lambda$ .

A regra de aprendizado de Rescorla-Wagner é fundamentalmente diferente da regra de aprendizado do modelo de Hull dada pela equação (1). Na equação (1), a variação da força de associação  $V_i$  depende apenas do seu valor atual. Já na equação (2), a variação da força de associação  $V_i$  depende do valor *agregado* das forças de associação de todos os CSs presentes naquele ensaio.

Para ajudar a entender a equação (2), veja a figura abaixo.



Rescorla



Wagner

## Interpretação

$$\Delta V_i = \alpha_i \left( \lambda - \sum_{j \in \{\text{ECs presentes}\}} V_j \right)$$

$\Delta V_i$ : Variação na força de associação do EC<sub>i</sub> com o EN. Representa a *expectativa* iniciada pelo estímulo EC<sub>i</sub> presente no complexo de estímulos.

$\lambda$ : Representa o evento (EN) que se segue ao complexo de estímulos.

$\sum_{j \in \{\text{ECs presentes}\}} V_j$ : Soma das forças de associação de todos os estímulos presentes no ensaio. Representa a expectativa composta iniciada pelo complexo de estímulos.

Segundo a regra de Rescorla-Wagner, o fenômeno do bloqueio de Kamin pode ser entendido da seguinte maneira. Quando apenas ruído (CS<sub>1</sub>) é apresentado ao animal, seguido pelo choque, por vários ensaios repetidos, a sua força de associação  $V_1$  com o choque cresce bastante (pois a discrepância entre  $\lambda$  e  $V_1$  – o único CS presente – tem um valor inicial grande). Posteriormente, quando os estímulos luz (CS<sub>2</sub>) e ruído (CS<sub>1</sub>) são apresentados conjuntamente, seguidos por choque, por vários ensaios repetidos, a força de associação da luz com o choque  $V_2$  não cresce tanto, pois a discrepância entre  $\lambda$  e  $(V_1 + V_2)$  – o valor agregado das forças de associação dos dois estímulos – é pequena. Desta forma, quando apenas luz (CS<sub>2</sub>) for apresentada ao animal em um teste posterior esta, por ter uma força de associação pequena, não eliciará a resposta comportamental ao choque.

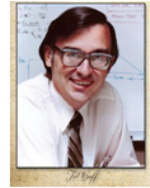
Um fato curioso, que só foi notado (pelo menos publicamente) pelos cientistas da computação estadunidenses Richard Sutton e Andrew Barto em um artigo de 1988<sup>1</sup>, é que a regra de aprendizado de Rescorla-Wagner é essencialmente idêntica à regra delta de Widrow-Hoff estudada na aula passada.

Para constatar isso, observem a figura abaixo.

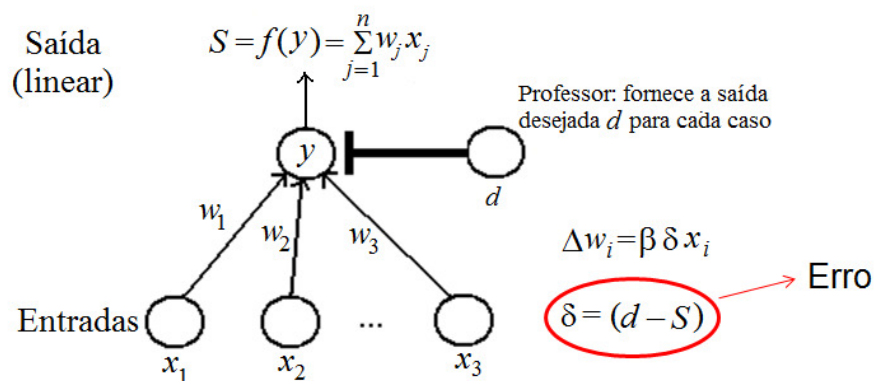


Widrow

## Regra delta



Hoff



Observem também as equações para as duas regras:

$$\Delta \omega_i = \beta \left( d - \sum_{j \in \{\text{entradas presentes}\}} \omega_j x_j \right) x_i \quad (\text{regra de Widrow-Hoff})$$

$$\Delta V_i = \alpha_i \left( \lambda - \sum_{j \in \{\text{CSs presentes}\}} V_j \right) \quad (\text{regra de Rescorla-Wagner})$$

A correspondência entre elas é feita tomando-se  $\omega_i = V_i$ ;  $d = \lambda$  quando o US está presente e  $d = 0$  quando ela não está; e  $x_i = 1$  se o CS<sub>i</sub> estiver presente e  $x_i = 0$  se o CS<sub>i</sub> não estiver presente.

<sup>1</sup>Sutton, R. S. and Barto, A. G., Toward a modern theory of adaptive networks: expectation and prediction. *Psychological Review*, 88: 135-170, 1988.

A tabela abaixo mostra as correspondências.

<b>Rescorla-Wagner</b>	<b>Widrow-Hoff</b>
Ensaio	Tempo
$CS_i$	$x_i$
$V_i$	$w_i$
US	Professor
$\lambda$	$z$

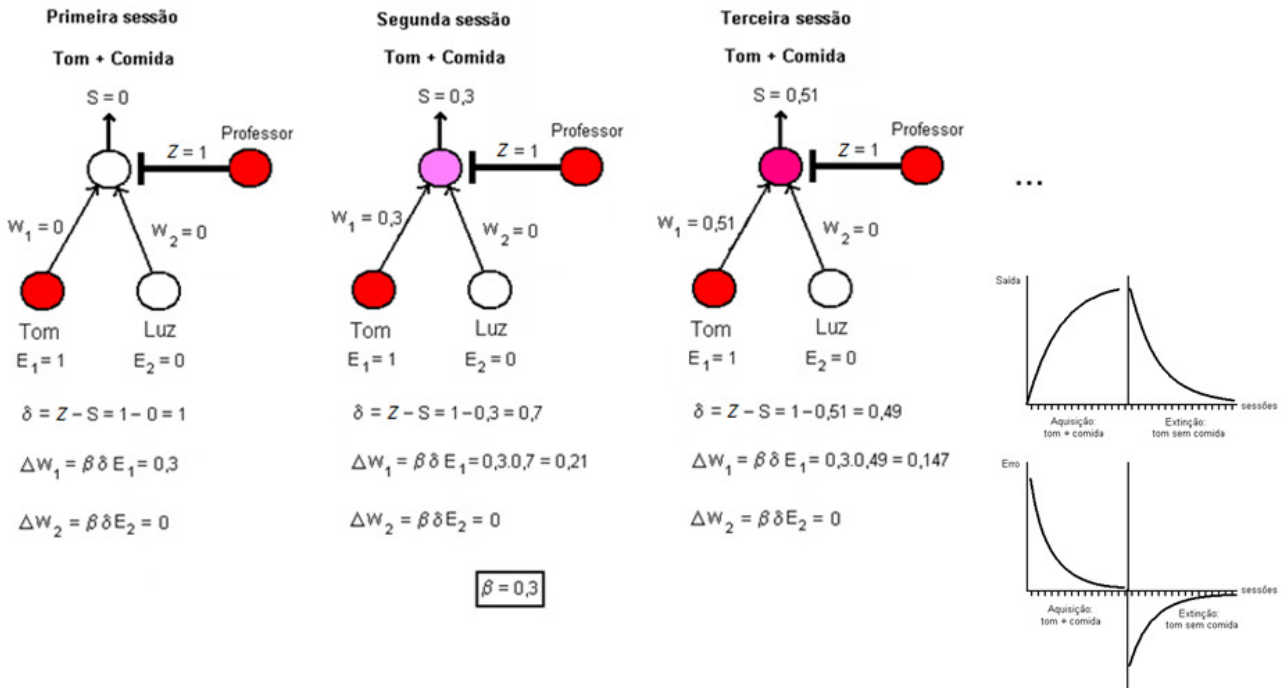
Segundo Sutton e Barto, em seu artigo de 1988:

*É surpreendente que esses dois modelos sejam, de fato, idênticos, pois eles foram construídos com propósitos bem diferentes. A regra de Widrow-Hoff foi formulada como um algoritmo para resolver sistemas de equações lineares e a sua teoria trata de propriedades de convergência. A teoria não apenas não discute efeitos do contexto dos estímulos, como a sua existência [do contexto] é puramente incidental. A teoria de Rescorla-Wagner foi proposta para descrever de forma compacta uma ampla variedade de efeitos observados em experimentos sobre aprendizado de animais. Que ela também forneça um importante algoritmo com forte conexão com áreas muito úteis da matemática aplicada é algo fortuito. Sentimos que a confluência dos fatos matemáticos e empíricos representados pelo que devemos chamar de regra de Rescorla-Wagner/Widrow-Hoff pode ter considerável significância para o entendimento do aprendizado associativo.*



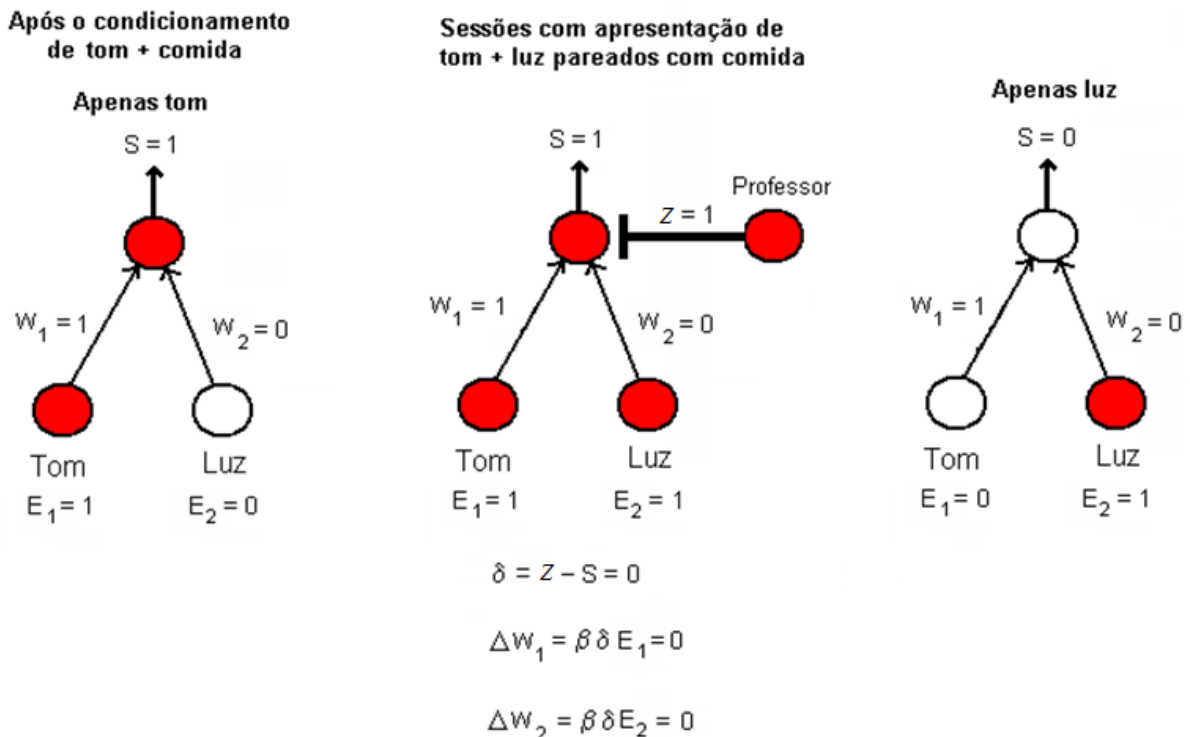
A regra de Rescorla-Wagner/Widrow-Hoff, como Sutton e Barto sugerem que ela seja chamada, pode modelar o condicionamento pavloviano. A figura abaixo ilustra isso.

### Aplicação da regra de W-H/R-W ao condicionamento pavloviano



Ela também consegue modelar o efeito blocking de Kamin (veja a figura abaixo).

### Exemplo de aplicação da regra de W-H/R-W: efeito blocking



Segundo Vogel *et al.* (2004; ver referência no início desta aula),

*O modelo de Rescorla-Wagner é o mais influente e bem sucedido modelo para condicionamento pavloviano. Ele dá conta de todos os fenômenos simples de condicionamento pavloviano, incluindo efeitos de seleção de estímulos, além de antecipar resultados de muitos estudos que foram feitos para testá-lo. É claro que o modelo possui várias limitações que estimularam a produção de novas teorias durante os últimos 32 anos. De fato, a história das teorias de aprendizado após 1972 pode ser contada, em parte, como a das tentativas de teóricos subsequentes em superar as limitações desse modelo.*

Um modelo alternativo para o fenômeno de competição entre estímulos foi apresentado pelo psicólogo inglês Nicholas Mackintosh (1935 – ) em 1975. Nesse modelo, ao invés de considerar que os estímulos competem entre si pelo nível máximo  $\lambda$  de associação com o US (uma propriedade que depende apenas do US), considera-se que os CSs competem entre si pela *atenção* do organismo a cada um deles (uma propriedade que depende dos CSs). Pode-se dizer que o modelo de Mackintosh assume que o animal presta mais atenção ao CS que é melhor preditor do reforço e ignora os CSs que são preditores pobres do reforço. Por causa disso, o modelo de Mackintosh é chamado de “atencional”.

Para implementar a sua hipótese, o modelo de Mackintosh faz com que, quando vários CSs estão presentes, o CS que é relativamente o melhor preditor do US tenha a sua associabilidade  $\alpha_i$  aumentada enquanto que os demais CSs têm suas associabilidades diminuídas. Formalmente, durante um ensaio em que um conjunto de CSs está presente a associabilidade  $\alpha_i$  do  $CS_i$  aumenta se a magnitude da discrepância entre a sua força de associação e o nível máximo  $\lambda$  de associação com o US,  $|\lambda - V_i|$ , for menor que  $|\lambda - \sum_{j \neq i} V_j|$ , onde a somatória sobre  $j$  neste termo cobre todas as forças de associação dos estímulos presentes com exceção do  $CS_i$ . Por outro lado, a associabilidade  $\alpha_i$  diminui se  $|\lambda - V_i| \geq |\lambda - \sum_{j \neq i} V_j|$ .

A magnitude do aumento ou diminuição de  $\alpha_i$  é proporcional à diferença entre  $|\lambda - V_i|$  e  $|\lambda - \sum_{j \neq i} V_j|$ . Para calcular a variação da força de associação do CS<sub>*i*</sub>, Mackintosh usa a mesma regra do modelo de Hull da equação (1).

Um terceiro modelo para competição entre estímulos foi proposto pelos psicólogos ingleses John Pearce e Geoffrey Hall em 1980. No modelo de Pearce-Hall, a atenção a um estímulo só é necessária enquanto o animal está aprendendo sobre sua significância, mas depois que o aprendizado atinge um estado estacionário ela não é mais necessária. Segundo eles, a associabilidade do estímulo CS<sub>*i*</sub> em em dado ensaio *n* é dada por:

$$\alpha_i^n = \left| \lambda^{n-1} - \sum_{j \in \left\{ \begin{array}{l} \text{CSs presentes} \\ \text{no ensaio } n-1 \end{array} \right\}} V_j^{n-1} \right|, \quad (3)$$

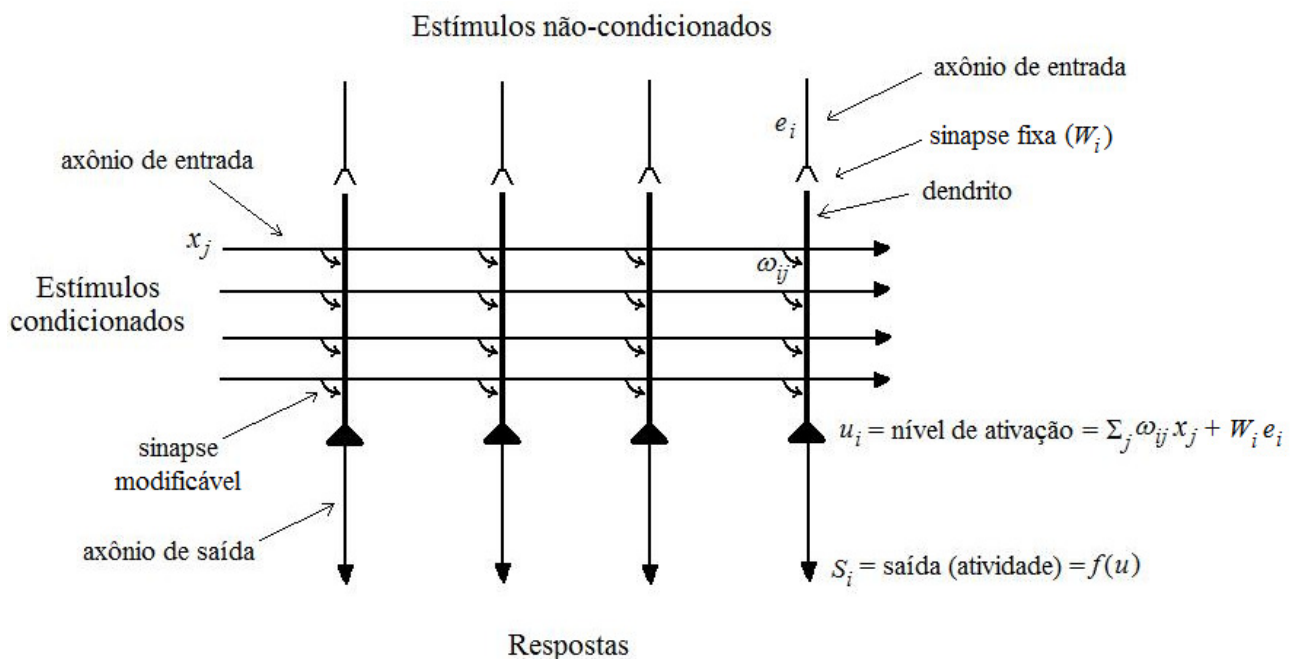
ou seja, a associabilidade do estímulo *i* no *n*-ésimo ensaio é determinada pela magnitude da discrepância entre o nível máximo  $\lambda$  e a soma total das forças de associação dos estímulos presentes no último ensaio anterior em que o estímulo *i* esteve presente. Segundo essa regra, a associabilidade de um estímulo será grande quando ele tiver sido apresentado com um US inesperado e será pequena quando ele tiver sido apresentado com um US esperado. No primeiro caso a magnitude da discrepância na equação (3) terá um valor alto e, no segundo caso, ela terá um valor baixo.

Segundo um artigo de revisão escrito por Pearce e Bouton em 2001<sup>2</sup>, há evidências experimentais que suportam tanto o modelo de Mackintosh como o de Pearce-Hall. A conclusão deles é a de que deve haver mais de um mecanismo capaz de alterar a associabilidade de um estímulo e que mecanismos diferentes devem ser governados por princípios diferentes, daí a existência de modelos diferentes.

<sup>2</sup> Pearce, J. M. and Bouton, M. E., Theories of associative learning in animals. *Ann. Rev. Psychol.*, 52:111-139, 2001.

Os modelos de Hull, Rescorla-Wagner, Mackintosh e Pearce-Hall podem ser classificados como modelos “de ensaios”, no sentido de que eles descrevem mudanças nas forças de associação apenas durante ensaios experimentais, mas não entre ensaios.

Um modelo conexionista genérico para implementar as regras de aprendizado de Hebb, Hull, Rescorla-Wagner, Mackintosh, Pearce-Hall ou qualquer outra que possa ser proposta e investigar as consequências dessas regras é o mostrado na figura a seguir.



Por exemplo, imaginemos uma situação em que haja apenas um estímulo não-condicionado (vamos tomá-lo como o estímulo mais à esquerda no desenho acima). Vamos supor que quando este US ocorre,  $e = 1$ . Vamos também supor que o peso da sinapse feita por este US sobre o neurônio de resposta tem valor fixo  $W = 1$ . Vamos considerar que o neurônio de resposta é linear com limiar igual a 0,5. No caso em que o US ocorre conjuntamente com um CS (por exemplo, o mais acima no desenho acima) e em que os pesos sinápticos  $\omega_{ij}$  são inicialmente todos nulos, teremos uma situação como a representada na figura abaixo (a figura tem o mesmo layout da figura acima).

	US				
CS	1	0	0	0	
1	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	
	1	0	0	0	Ativação $u_i$
	1	0	0	0	Saída $S_i$

Vamos supor que os pesos são modificáveis pela regra de Rescorla-Wagner/Widrow-Hoff,

$$\Delta \omega_i = \alpha_i \left( \lambda - \sum_j \omega_j x_j \right) x_i \quad \text{quando } US = 1$$

$$\Delta \omega_i = \alpha_i \left( 0 - \sum_j \omega_j x_j \right) x_i \quad \text{quando } US = 0$$

Vamos fazer  $\alpha_i = \alpha = 0,2$  e  $\lambda = 1$ .

Portanto, após o primeiro ensaio de pareamento US – CS<sub>1</sub> como mostrado acima, os pesos são modificados para a configuração mostrada abaixo.

	US				
CS	1	0	0	0	
1	0,2	0	0	0	
0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	

O segundo ensaio de pareamento entre US – CS<sub>1</sub> produz então a seguinte situação.

		US				
CS		1	0	0	0	
1		0,2	0	0	0	
0		0	0	0	0	
0		0	0	0	0	
0		0	0	0	0	
		1,2	0	0	0	Ativação $u_i$
		1,2	0	0	0	Saída $S_i$

E a nova configuração de pesos é a seguinte:

		US			
CS		1	0	0	0
1		0,36	0	0	0
0		0	0	0	0
0		0	0	0	0
0		0	0	0	0

Após mais um ensaio de pareamento US – CS<sub>1</sub>, a configuração de pesos fica:

		US			
CS		1	0	0	0
1		0,49	0	0	0
0		0	0	0	0
0		0	0	0	0
0		0	0	0	0

E após o quarto ensaio de pareamento US – CS<sub>1</sub> a configuração de pesos é:

	US			
CS	1	0	0	0
1	0,59	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Se agora o CS<sub>1</sub> for apresentado sozinho, sem pareamento com o US, teremos:

	US				
CS	0	0	0	0	
1	0,59	0	0	0	
0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	
	0,59	0	0	0	Ativação $u_i$
	0,59	0	0	0	Saída $S_i$

Faça como exercício o que acontece quando o CS<sub>1</sub> é apresentado repetidas vezes sem a ocorrência do US (extinção) e o que acontece quando, a partir da situação acima, apresenta-se o CS<sub>2</sub> pareado com o CS<sub>1</sub> e o US (efeito blocking).