

# Aprendizagem por Reforço

Fabrício Barth

Insper Instituto de Ensino e Pesquisa

Maio de 2022

Até o momento vimos nesta disciplina:

- Conceito de Agente Autônomo;
- Solução de problemas usando busca em espaço de estados:
  - Algoritmos de busca cega, e;
  - Algoritmos de busca informados.
- Busca competitiva.

# Conteúdo desta aula e das próximas

- Visão Geral sobre Aprendizagem por Reforço
- Algoritmo Q-Learning
- Implementações com o projeto GYM
- Considerações Finais
- Material de Consulta

# Ao final deste material você saberá

- o que é **Aprendizagem por Reforço** e os seus principais conceitos;
- como desenvolver um agente autônomo usando o algoritmo **Q-Learning**, e;
- quais os aspectos positivos e negativos do algoritmo **Q-Learning**.

# Taxi Driver



Podemos implementar uma solução para este problema usando o algoritmo  $A^*$ . Neste caso, **o que é necessário fazer?**

Definir uma **Heurística**  $H$  que seja admissível e que traga algum valor para o processo de busca.

# Ambientes competitivos



Podemos implementar uma solução para este tipo de problema usando o algoritmo MIN-MAX. Neste caso, *o que é necessário fazer?*

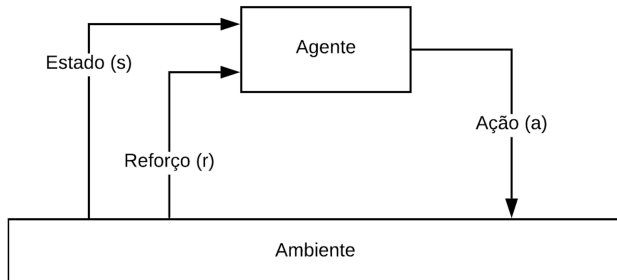
Definir uma **função de utilidade** que consegue descrever a utilidade dos estados possíveis para o meu agente.



E se fosse possível desenvolver um agente autônomo sem ter que codificar nenhum conhecimento sobre a tarefa que ele precisa executar (heurísticas ou funções de utilidade específicas)?

# Aprendizagem por Reforço: Visão Geral

Um agente aprende a resolver uma tarefa através de repetidas interações com o ambiente, por tentativa e erro, recebendo (esporadicamente) reforços (punições ou recompensas) como retorno.



# Aprendizagem por Reforço: Visão Geral

- Este agente não tem conhecimento algum sobre a tarefa que precisa executar (heurísticas ou funções de utilidade específicas).

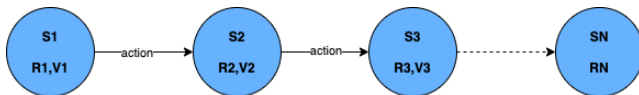
# Aprendizagem por Reforço: Visão Geral

- Este agente não tem conhecimento algum sobre a tarefa que precisa executar (heurísticas ou funções de utilidade específicas).
- Sendo assim, **como é que o agente consegue atingir um determinado objetivo?**

# Aprendizagem por Reforço: Visão Geral

- Este agente não tem conhecimento algum sobre a tarefa que precisa executar (heurísticas ou funções de utilidade específicas).
- Sendo assim, **como é que o agente consegue atingir um determinado objetivo?**
- O agente aprende uma **política de controle**, executando uma **sequência de ações** e observando as suas **consequências**.

- A política de controle desejada é aquela que **maximiza** os reforços (*reward*) acumulados ao longo do tempo pelo agente:  
 $r_0 + \gamma r_1 + \gamma^2 r_2 + \dots$  onde  $0 \leq \gamma < 1$ .



- O  $V(s_1)$  será a soma de  $r_1$  com o  $V(s_2)$ . No entanto, considerando o fator de desconto  $\gamma$ , temos:  $V(s_1) = r_1 + \gamma V(s_2)$ .
- O valor de um estado final leva-se em consideração apenas o reforço:  $V(s_n) = r_n$ .

# Fator de desconto $\gamma$

- O fator de desconto ( $\gamma$ ) é um hiperparâmetro que consiste em um número entre 0 e 1 que define a importância das recompensas futuras em relação a atual ( $0 \leq \gamma < 1$ ).
- Valores mais próximos ao 0 dão mais importância a recompensas imediatas enquanto os mais próximos de 1 tentarão manter a importância de recompensas futuras.

# Exemplo

Início	Campo	Campo	Campo
Campo	Buraco	Campo	Buraco
Campo	Campo	Campo	Buraco
Buraco	Campo	Campo	<b>Objetivo</b>

## Ações:

- (0) Mover para Baixo; (1) Mover para Cima;
- (2) Move para Direita; (3) Move para Esquerda.



# Algoritmo Q-Learning

- Considerando que o local do objetivo, dos buracos e dos campos serão sempre os mesmos então temos **16** estados possíveis.
- Este problema tem **4** ações possíveis.
- Se o agente cair em um buraco ele recebe  $-1$  como recompensa, se ele ir para um campo ele recebe  $0$  e ao chegar no objetivo ele recebe  $1$ .
- Para que agente possa identificar uma política de controle ótima este agente precisa criar um **mapeamento** entre **estados** (S) e **ações** (A)

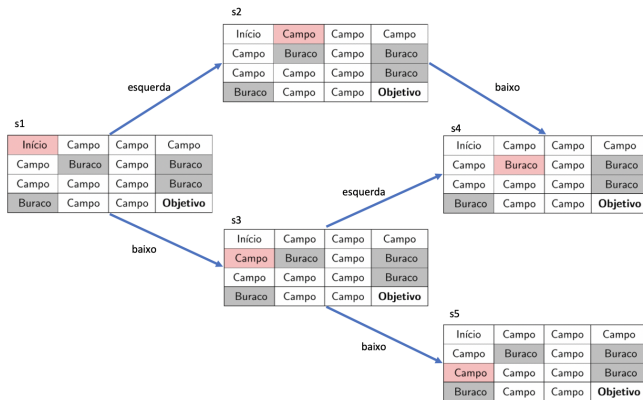
# Algoritmo Q-Learning

- Este mapeamento pode ser representado por uma função  $Q(S, A)$  onde  $S$  são todos os estados possíveis ( $s_1, s_2, \dots$ ) e onde  $A$  são todas as ações possíveis ( $a_1, a_2, \dots$ )

Q-table	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
$s_1$				
$s_2$				
$\dots$				
$s_n$				

- Para criar um **mapeamento**  $Q(S, A)$  é necessário executar o agente no ambiente considerando o **reforço** dado por cada ação.

# Algoritmo Q-Learning



reforço

	esquerda	baixo
S1	0	0
S2	0	-1
S3	-1	0
S4	0	0
S5	0	0

Como é que o agente pode saber quais são as melhores ações em cada estado?

- A ideia é fazer com que o agente aprenda a função de mapeamento  $Q(S, A)$ . Ou seja, que seja capaz de identificar qual é a melhor ação para cada estado através das suas **experiências**.
- *Testando* **infinitas** vezes o ambiente. Ou seja, *testando* **muitas** vezes as combinações entre **estados** ( $S$ ) e **ações** ( $A$ ).

# Algoritmo Q-Learning

Início	Campo	Campo	Campo
Campo	Buraco	Campo	Buraco
Campo	Campo	Campo	Buraco
Buraco	Campo	Campo	<b>Objetivo</b>

Primeiro episódio ( $\gamma = 0.9$ ):

$$Q(s_1, \text{baixo}) \leftarrow r + \gamma \max_{a'} Q(s', a')$$

$$Q(s_1, \text{baixo}) \leftarrow 0 + 0.9 \times \max[0, 0, 0]$$

$$Q(s_2, \text{direita}) \leftarrow -1 + 0.9 \times \max[0, 0, 0, 0]$$

(1)

# Algoritmo Q-Learning

Q-table resultante da execução do 1º episódio.

<b>Q-table</b>	<i>esquerda</i>	<i>baixo</i>	<i>direita</i>	<i>cima</i>
$s_1$	0	0	0	0
$s_2$	0	0	-1	0
$s_3$	0	0	0	0
$s_4$	0	0	0	0
...	...	...	...	...
$s_n$	0	0	0	0

# Algoritmo Q-Learning

Q-table resultante da execução do  $n$ -ésimo episódio.

<b>Q-table</b>	<i>esquerda</i>	<i>baixo</i>	<i>direita</i>	<i>cima</i>
$s_1$	0.02	0.03	0.0001	0.0001
$s_2$	0.00	0.05	-0.003	0.001
...	...	...	...	...
$s_n$	0.985	0.0001	0.003	0.002

Após a execução de  $n$  episódios o agente conhece qual a melhor ação para cada estado.



# Algoritmo Q-Learning

```
function Q-Learning(env,  $\alpha$ ,  $\gamma$ , episódios)  
  inicializar os valores de  $Q(s, a)$  arbitrariamente  
  for todos os episódios do  
    inicializar  $s$  a partir de env  
    repeat  
      escolher uma ação  $a$  para um estado  $s$   
      executar a ação  $a$   
      observar a recompensa  $r$  e o novo estado  $s'$   
       $Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha[r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)]$   
       $s \leftarrow s'$   
    until  $s$  ser um estado final  
  end for  
  return  $Q(s, a)$ 
```

parte1: atualização da *Q-table*

# Algoritmo Q-Learning: hiperparâmetro $\alpha$

- $\alpha$  é a taxa de aprendizado ( $0 < \alpha \leq 1$ ), quanto maior, mais valor dá ao novo aprendizado.

# Que ação escolher?

```
function Q-Learning(env,  $\alpha$ ,  $\gamma$ , episódios)
  inicializar os valores de  $Q(s, a)$  arbitrariamente
for todos os episódios do
  inicializar  $s$  a partir de  $env$ 
  repeat
    escolher uma ação  $a$  para um estado  $s$ 
    executar a ação  $a$ 
    observar a recompensa  $r$  e o novo estado  $s'$ 
     $Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha[r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)]$ 
     $s \leftarrow s'$ 
  until  $s$  ser um estado final
end for
return  $Q(s, a)$ 
```

# Exploration vs Exploitation

- A política que o agente utiliza para escolher uma ação  $a$  para um estado  $s$  não interfere no aprendizado da  $Q$ -table.

# Exploration vs Exploitation

- A política que o agente utiliza para escolher uma ação  $a$  para um estado  $s$  não interfere no aprendizado da  $Q$ -table.
- No entanto, para que o algoritmo  $Q$ -learning possa convergir para um determinado problema é necessário que o algoritmo visite pares de ação-estado infinitas (muitas) vezes.

# Exploration vs Exploitation

- A política que o agente utiliza para escolher uma ação  $a$  para um estado  $s$  não interfere no aprendizado da  $Q$ -table.
- No entanto, para que o algoritmo  $Q$ -learning possa convergir para um determinado problema é necessário que o algoritmo visite pares de ação-estado infinitas (muitas) vezes.
- Por isso, que a escolha de determinada ação em um estado poderia ser feita de forma **aleatória**.

# Exploration vs Exploitation

- A política que o agente utiliza para escolher uma ação  $a$  para um estado  $s$  não interfere no aprendizado da  $Q$ -table.
- No entanto, para que o algoritmo  $Q$ -learning possa convergir para um determinado problema é necessário que o algoritmo visite pares de ação-estado infinitas (muitas) vezes.
- Por isso, que a escolha de determinada ação em um estado poderia ser feita de forma **aleatória**.
- Porém, normalmente se utiliza uma política que inicialmente escolhe aleatoriamente as ações, e, à medida que vai aprendendo, passa a utilizar cada vez mais as decisões determinadas pela política derivada de  $Q$ .



# Exploration vs Exploitation

- A política que o agente utiliza para escolher uma ação  $a$  para um estado  $s$  não interfere no aprendizado da  $Q$ -table.
- No entanto, para que o algoritmo  $Q$ -learning possa convergir para um determinado problema é necessário que o algoritmo visite pares de ação-estado infinitas (muitas) vezes.
- Por isso, que a escolha de determinada ação em um estado poderia ser feita de forma **aleatória**.
- Porém, normalmente se utiliza uma política que inicialmente escolhe aleatoriamente as ações, e, à medida que vai aprendendo, passa a utilizar cada vez mais as decisões determinadas pela política derivada de  $Q$ .
- Esta estratégia inicia **explorando** (tentar uma ação mesmo que ela não tenha o maior valor de  $Q$ ) e termina escolhendo a ação que tem o maior valor de  $Q$  (*exploitation*).

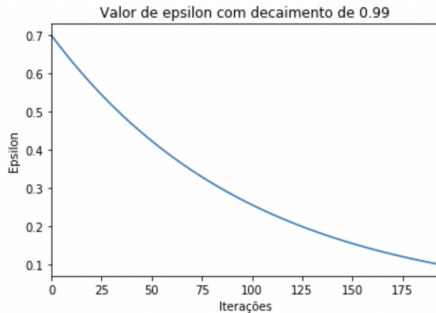
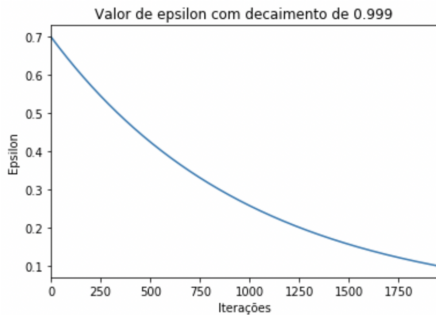
# Exemplo de função para escolha de ações

A escolha de uma ação para um estado é dada pela função:

```
function escolha( $s, \epsilon$ ):  $a$   
   $rv = \text{random } (0 < rv \leq 1)$   
  if  $rv < \epsilon$  then  
    return uma ação  $a$  aleatória em  $A$   
  end if  
  return  $\max_a Q(s, a)$ 
```

O fator de exploração  $\epsilon$  ( $0 \leq \epsilon \leq 1$ ) inicia com um valor alto (0.7, por exemplo) e, conforme a simulação avança, diminui:  $\epsilon \leftarrow \epsilon \times \epsilon_{dec}$ , onde  $\epsilon_{dec} = 0.99$

# Epsilon



# Algoritmo Q-Learning

```
function Q-Learning(env,  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\epsilon$ ,  $\epsilon_{min}$ ,  $\epsilon_{dec}$ , episódios)  
  inicializar os valores de  $Q(s, a)$  arbitrariamente  
  for todos os episódios do  
    inicializar  $s$  a partir de env  
    repeat  
       $a \leftarrow \text{escolha}(s, \epsilon)$   
       $s', r \leftarrow \text{executar a ação } a \text{ no } env$   
       $Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha[r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)]$   
       $s \leftarrow s'$   
    until  $s$  ser um estado final  
    if  $\epsilon > \epsilon_{min}$  then  $\epsilon \leftarrow \epsilon \times \epsilon_{dec}$   
  end for  
  return  $Q$ 
```

# Atividade de implementação

parte2:  $\alpha$ ,  $\gamma$ , exploration vs exploitation.

# Implementações com o projeto GYM

- Siga as orientações que estão no arquivo README.md da pasta <https://github.com/fbarth/reinLearn>.
- Execute as atividades que estão descritas no arquivo atividades\_01.md no mesmo diretório ([https://github.com/fbarth/reinLearn/atividades\\_01.md](https://github.com/fbarth/reinLearn/atividades_01.md)).

- O algoritmo *Q-Learning* pode ser utilizado por agentes que não tem conhecimento prévio sobre o problema.
- *Q-Learning* converge em ambientes **determinísticos** e **não-determinísticos**.
- Na prática, o algoritmo *Q-Learning* necessita de muitas iterações de treinamento até convergir, inclusive para problemas que não tem um espaço de busca tão grande.

# Considerações Finais

- *E quando o espaço de busca for muito grande?*
- Usar *Deep Learning* com *Reinforcement Learning*! Assunto do nosso próximo encontro!
- Ler o capítulo 18. *Reinforcement Learning* até a seção *Implementing Deep Q-Learning* do livro **Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow, 2nd Edition** do Aurélien Géron.
- Referência adicional:  
<https://deepmind.com/research/case-studies/alphago-the-story-so-far>



# O que vimos até o momento?

- o que é **Aprendizagem por Reforço** e os seus principais conceitos;
- como desenvolver um agente autônomo usando o algoritmo **Q-Learning**;
- quais os aspectos positivos e negativos do algoritmo **Q-Learning**, e;
- funcionamento da biblioteca **Gym**.

- Tom Mitchell. Machine Learning. McGraw-Hill, 1997.
- Richard Sutton and Andrew Barto. Reinforcement Learning: An Introduction. Second Edition, in progress. The MIT Press, 2015.
- Projeto Gym: <https://gym.openai.com/>
- <https://deepmind.com/research/case-studies/alphago-the-story-so-far>
- Aurélien Géron. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow, 2nd Edition, 2019.