

Aprendizagem por Reforço

Fabício Barth

Insper Instituto de Ensino e Pesquisa

Abril de 2023

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 e SARSA
- Implementações com os projetos GYMNASIUM e PETTINGZOO.

Ao final deste material você saberá

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

Taxi Driver - OpenAI Gym



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



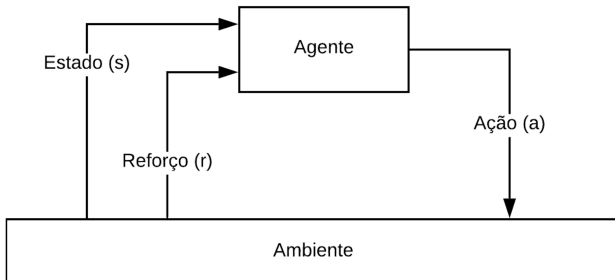
Podemos implementar uma solução para este tipo de problema usando o algoritmo MIN-MAX. Neste caso, *o que é necessário fazer?*

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?**

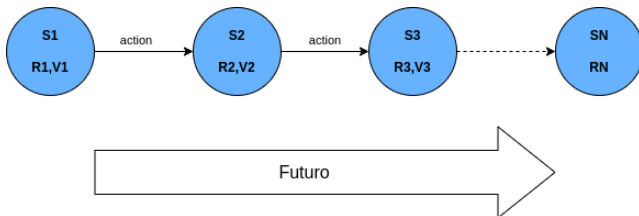
Aprendizagem por Reforço: Visão Geral

- 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** por tentativa e erro, e observando as suas **consequências**.

Política de Controle

- A política de controle desejada é aquela que **maximiza** os reforços (*reward*) acumulados ao longo do tempo pelo agente:

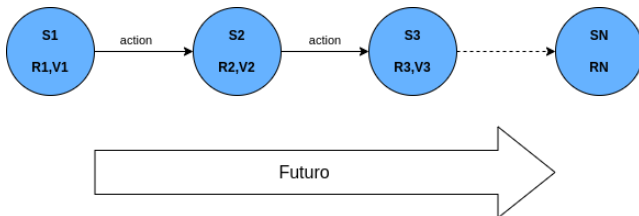
$$r_0 + \gamma r_1 + \gamma^2 r_2 + \dots \text{ onde } 0 \leq \gamma < 1.$$



Política de Controle

- A política de controle desejada é aquela que **maximiza** os reforços (*reward*) acumulados ao longo do tempo pelo agente:

$$r_0 + \gamma r_1 + \gamma^2 r_2 + \dots \text{ onde } 0 \leq \gamma < 1.$$



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

Exemplo

Início	Campo	Campo	Campo
Campo	Buraco	Campo	Buraco
Campo	Campo	Campo	Buraco
Buraco	Campo	Campo	Objetivo

Ações que o agente sabe executar:

- 1 Mover para Baixo (\downarrow)
- 2 Mover para Cima (\uparrow)
- 3 Mover para Direita (\rightarrow)
- 4 Mover para Esquerda (\leftarrow)

Exemplo

- 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**.

Considere o seguinte estado

Início	Campo	Campo	Campo
Campo	Buraco	Campo	Buraco
Campo	Campo	Campo	Buraco
Buraco	Campo	Campo	Objetivo

- Se o agente for para \rightarrow (direita) então $V(s_n) = 1$

Considere um estado anterior s_{n-1}

Início	Campo	Campo	Campo
Campo	Buraco	Campo	Buraco
Campo	Campo	Campo	Buraco
Buraco	Campo	Campo	Objetivo

- Se o agente for para \rightarrow (direita) então $V(s_{n-1}) = -1$
- Se o agente for para \downarrow (baixo) então:

$$\begin{aligned} V(s_{n-1}) &= r(s_{n-1}) + \gamma V(s_n) \\ V(s_{n-1}) &= 0 + \gamma \times 1 \end{aligned} \tag{1}$$

Considere um estado anterior s_{n-2}

Início	Campo	Campo	Campo
Campo	Buraco	Campo	Buraco
Campo	Campo	Campo	Buraco
Buraco	Campo	Campo	Objetivo

- Se o agente for para \rightarrow (direita) então $V(s_{n-2}) = -1$
- Se o agente for para \leftarrow (esquerda) então $V(s_{n-2}) = -1$
- Se o agente for para \downarrow (baixo) então:

$$V(s_{n-2}) = r(s_{n-2}) + \gamma V(s_{n-1}) + \gamma^2 V(s_n) \quad (2)$$

$$V(s_{n-1}) = 0 + \gamma \times (\gamma^2 \times 1) + \gamma^2 \times 1$$

Fator de desconto γ

- O fator de desconto (γ) 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.

Para que agente possa identificar uma política de controle ótima este agente precisa criar um **mapeamento** entre **estados** (S) e **ações** (A).

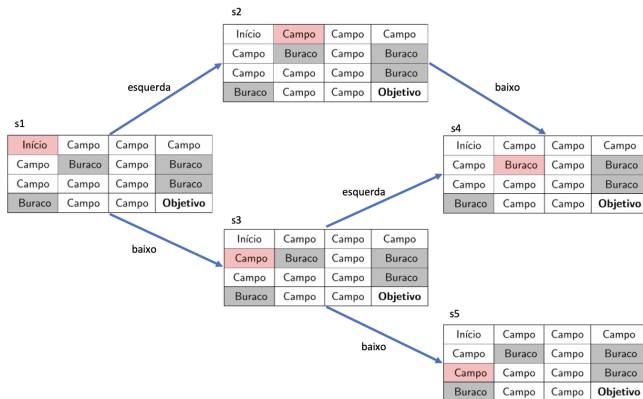
Algoritmo Q-Learning

- 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?

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	Objetivo

Primeiro episódio ($\gamma = 0.9$):

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

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

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

Algoritmo Q-Learning

Q-table resultante da execução do 1º episódio.

Q-table	<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.

Q-table	<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  $Q(s, a)$ 
```

Atividade de implementação

Setup do ambiente

Faça o clone ou fork do projeto https://github.com/Insper/rl_code [▶ Link](#)

Atualização da Q-table

O objetivo desta atividade é implementar a rotina responsável pela atualização da *Q-table* no arquivo `QLearning.py`

Atividades

Siga o roteiro descrito em https://insper.github.io/ia_bcc/aulas/15_rl/

[▶ Link](#)

Algoritmo Q-Learning: hiperparâmetro α

- α 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

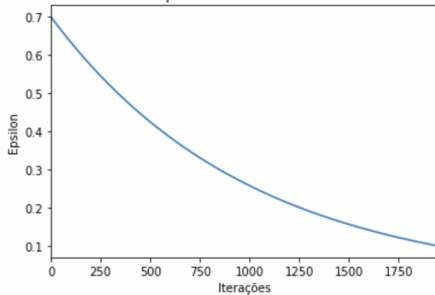
A escolha de uma ação para um estado é dada pela função:

```
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  $\max_a Q(s, a)$ 
```

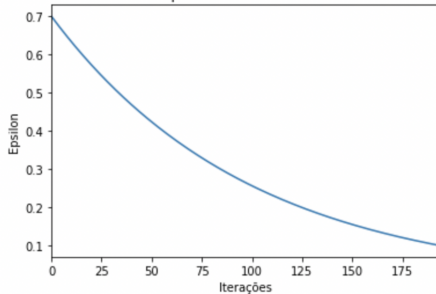
O fator de exploração ϵ ($0 \leq \epsilon \leq 1$) inicia com um valor alto (0.7, por exemplo) e, conforme a simulação avança, diminui: $\epsilon \leftarrow \epsilon \times \epsilon_{dec}$, onde $\epsilon_{dec} = 0.99$

Epsilon

Valor de epsilon com decaimento de 0.999



Valor de epsilon com decaimento de 0.99



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

Hiperparâmetros e seleção das ações

O objetivo desta atividade é compreender o funcionamento e impacto dos hiperparâmetros de α , γ e dos conceitos de *exploration* e *exploitation*.

Atividades

Siga o roteiro descrito em

https://insper.github.io/ia_bcc/aulas/15_rl_parte2/ [▶ Link](#)

A regra para update da **Q-table** no algoritmo **Q-Learning** é:

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha[r + \gamma \max_{A'} Q(s', A') - Q(s, a)] \quad (3)$$

A diferença entre o novo valor e a estimativa antiga é utilizada para atualizar a estimativa antiga. O algoritmo **Q-Learning** considera como o novo valor o valor máximo das possibilidades no novo estado s' :

$$\max_{A'} Q(s', A') \quad (4)$$

- No entanto, a ação realmente executada pelo agente pode não ser a ação que tem o valor máximo em s' devido a função de escolha da ação ser baseada no valor de ϵ e ter características aleatórias.
- Por isso que o algoritmo **Q-Learning** é chamado de **off-policy**.

SARSA: on-policy

O algoritmo SARSA é chamado de **on-policy** porque ele atualiza a **Q-table** da seguinte forma:

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha[r + \gamma Q(s', a') - Q(s, a)] \quad (5)$$

o algoritmo SARSA atualiza $Q(s, a)$ considerando a real ação a' executada pelo agente em s' .

SARSA: on-policy

function *Sarsa*(*env*, α , γ , ϵ , ϵ_{min} , ϵ_{dec} , *episódios*)

inicializar os valores de $Q(s, a)$ arbitrariamente

for todos os episódios **do**

inicializar s a partir de *env*

$a \leftarrow \text{escolha}(s, \epsilon)$

repeat

$s', r \leftarrow$ executar a ação a no *env*

$a' \leftarrow \text{escolha}(s', \epsilon)$

$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha[r + \gamma Q(s', a') - Q(s, a)]$

$s \leftarrow s'$

$a \leftarrow a'$

until s ser um estado final

if $\epsilon > \epsilon_{min}$ **then** $\epsilon \leftarrow \epsilon \times \epsilon_{dec}$

end for

return Q

Atividade de implementação

Comparando Q-LEARNING e SARSA

O objetivo desta atividade é implementar o algoritmo SARSA e compará-lo com o Q-LEARNING.

Atividades

Siga o roteiro descrito em https://insper.github.io/rl/classes/05_x_sarsa/

► Link

- 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 Gymnasium [▶ Link](#)
- Projeto PettingZoo [▶ Link](#)