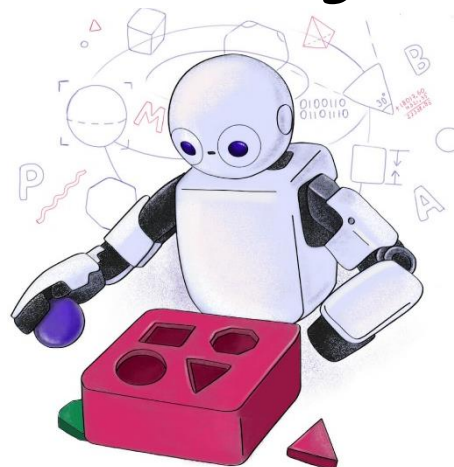


# T320 - Introdução ao Aprendizado de Máquina II: *Redes Neurais Artificiais (Parte IV)*



**Inatel**

Felipe Augusto Pereira de Figueiredo  
felipe.figueiredo@inatel.br

# Recapitulando

- No último tópico, discutimos como as redes neurais aprendem.
- Vimos que isso é feito através da minimização de uma função de erro (também chamada de função de custo).
  - Usamos o ***erro quadrático médio*** por questões didáticas, mas existem várias outras funções como por exemplo a ***entropia cruzada***, usada para o treinamento de classificadores e a ***focal loss*** para o treinamento de detectores de objetos.
- Aprendemos que a minimização da função de erro é realizada de forma iterativa usando o algoritmo da retropropagação do erro para calcular os vetores gradiente.
- Analisamos como a retropropagação funciona através de um exemplo.
- Neste tópico, iremos discutir algumas questões práticas para o treinamento de redes neurais.

# Algumas questões práticas sobre algoritmos de aprendizado

- Podemos dizer que os ***elementos básicos do aprendizado de máquina*** através de ***redes neurais*** foram apresentados até aqui.
- Porém, existem alguns aspectos práticos que nós precisamos discutir.
- Portanto, começamos relembrando sobre a questão do ***cálculo do vetor gradiente***.

# Cálculo do vetor gradiente

- Conforme vimos anteriormente, a base para o aprendizado de redes MLP é a obtenção do ***vetor gradiente*** e o estabelecimento de um ***processo iterativo de busca*** dos ***pesos*** que minimizem a ***função de erro***.
- Vimos que a obtenção do ***vetor gradiente*** se dá através do processo de ***retropropagação do erro***, o qual é dividido em duas etapas:
  - Etapa direta (***forward***) onde se apresenta um exemplo de entrada,  $x$ , e obtém-se a resposta da rede e, conseqüentemente, o ***erro de saída***.
  - Etapa reversa (***retropropagação***) em que se calculam as derivadas parciais necessárias ao longo das camadas da rede.

# Cálculo do vetor gradiente

- Vimos que a derivada parcial do erro em relação a um peso qualquer é a média de ***gradientes particulares (ou locais)***

$$\frac{\partial J(\mathbf{W})}{\partial w_{i,j}^m} = \frac{1}{N_{\text{dados}} N_M} \sum_{n=1}^{N_{\text{dados}}} \sum_{j=1}^{N_M} \underbrace{\frac{\partial e_j^2(n)}{\partial w_{i,j}^m}}_{\text{Gradiente local}} = \frac{1}{N_{\text{dados}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{dados}}} \nabla J_n(\mathbf{W}).$$

- O ***gradiente local*** é a derivada parcial do erro da  $j$ -ésima saída da rede para o  $n$ -ésimo exemplo de entrada em relação ao peso  $w_{i,j}^m$ .
- $\nabla J_n(\mathbf{W})$  é a média dos  $N_M$  ***gradientes locais*** para o  $n$ -ésimo exemplo de entrada.
- No entanto, aqui surge um questionamento importante:
  - O que é melhor, usar a ***média dos  $N_M$  gradientes locais,  $\nabla J_n(\mathbf{W})$ , e já dar um passo de otimização***, ou seja, atualizar os pesos, ***reunir o gradiente completo e então dar um passo único e mais preciso*** ou ***um meio termo***?

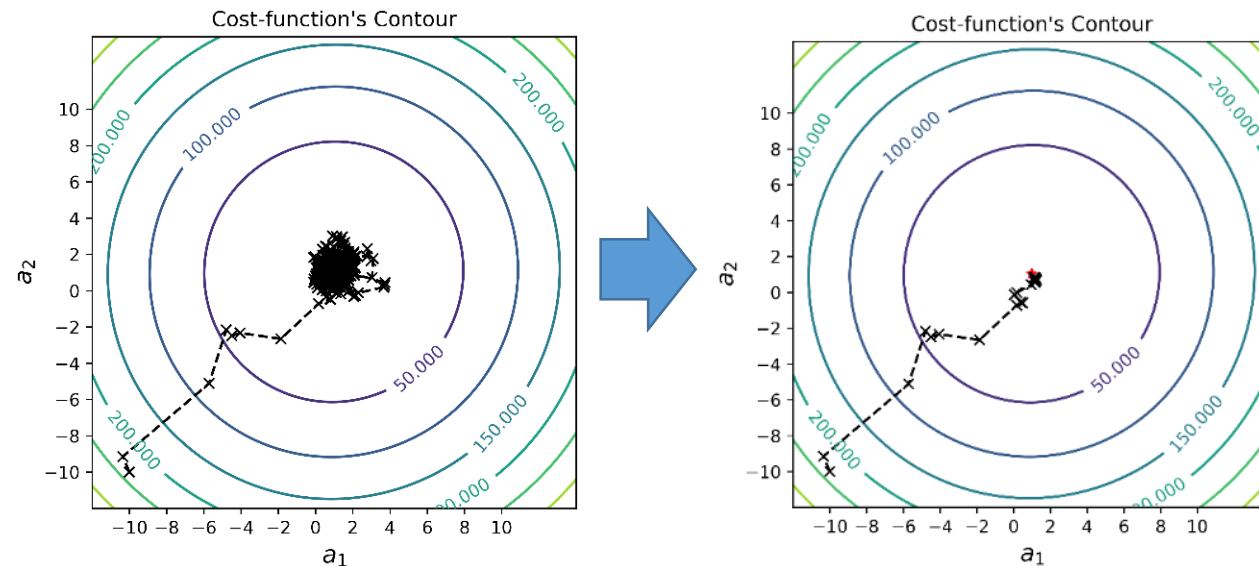
# Cálculo do vetor gradiente

- Esse questionamento gera três abordagens possíveis para o cálculo do vetor gradiente.
  - O cálculo usando todos os exemplos (batelada).
  - O cálculo (i.e., estimativa) usando um único exemplo (estocástica).
  - O cálculo usando um subconjunto de exemplos (mini-*batches*).
- Nas ***redes neurais profundas*** (ou ***deep learning***), usadas com muita frequência em problemas possuem enormes conjuntos de dados, usa-se a abordagem com ***mini-batches***, pois com ela, podemos controlar a complexidade computacional necessária para o treinamento.
- **OBS.:** Os exemplos para estimativa do vetor gradiente com as versões ***estocástica*** e ***mini-batch*** devem ser ***aleatoriamente*** escolhidos a partir do conjunto de treinamento.

# Variações dos algoritmos de otimização dos pesos

- Existem algumas **modificações** que podem ser aplicadas às versões estocásticas (mini-*batch* e estocástica) para **melhorar seu desempenho sem aumentar muito sua complexidade computacional**.
- As modificações mais usadas são:
  - Redução gradual do passo de aprendizagem,
  - Adição do termo momentum,
  - Adição do termo momentum de Nesterov,
  - Adição de passos de aprendizagem adaptativos.

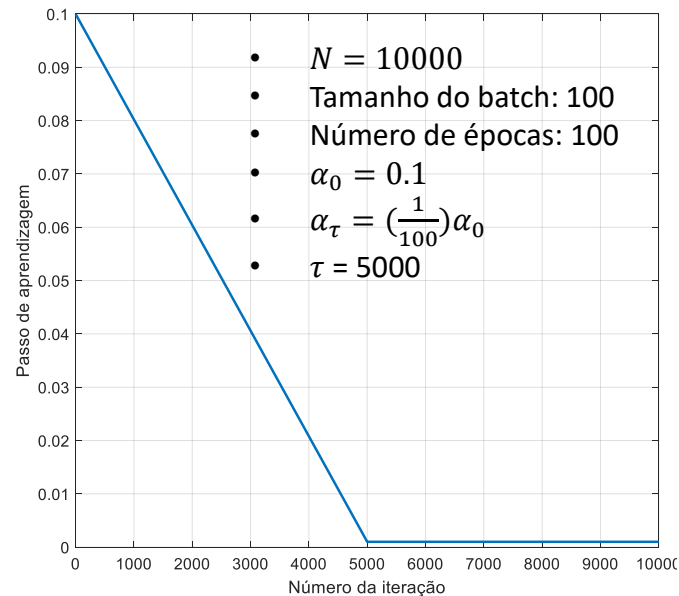
# Redução gradual do passo de aprendizagem



- Assim como fizemos com as versões estocásticas do gradiente descendente quando trabalhamos com regressores lineares, podemos **reduzir o passo de aprendizagem para tornar essas versões mais comportadas e, esperançosamente, obter a convergência.**
- Podemos utilizar todas as técnicas que aprendemos antes: **redução por degraus, decaimento exponencial ou temporal.**



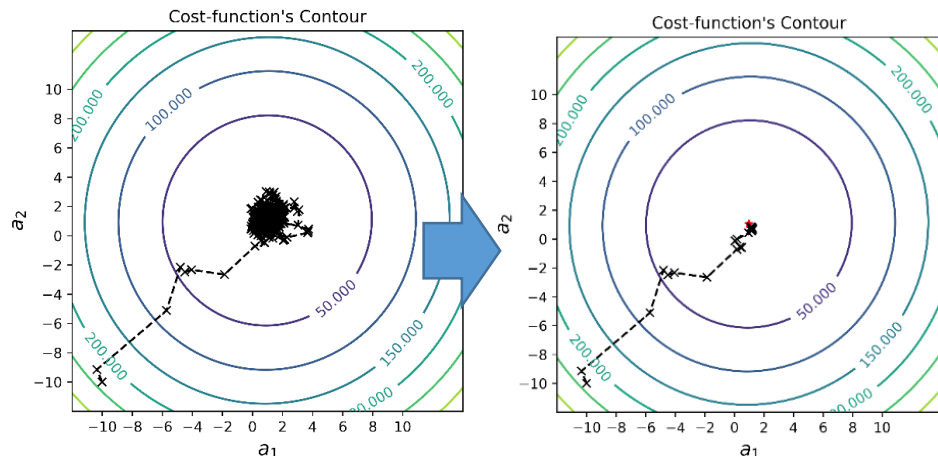
# Redução gradual do passo de aprendizagem



- As figuras mostram o resultado do uso da técnica de redução temporal com a equação

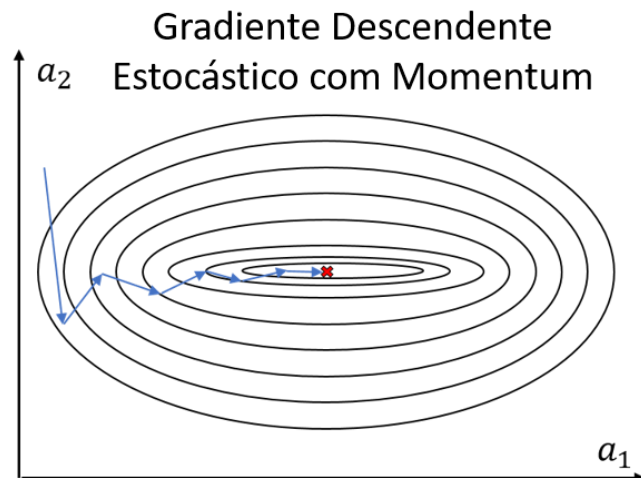
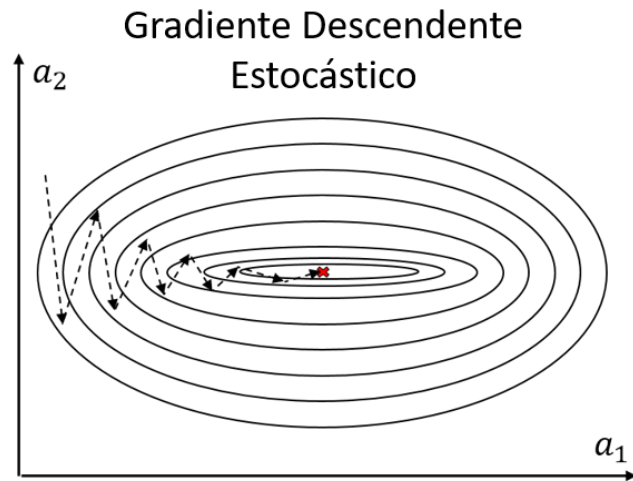
$$\alpha_j = \left(1 - \frac{j}{\tau}\right) \alpha_0 + \frac{j}{\tau} \alpha_\tau,$$

onde  $j$  é o contador de iterações,  $\alpha_0$  é o valor inicial do passo,  $\tau$  é o número da iteração a partir da qual o passo fica constante e  $\alpha_\tau$  é o valor constante do passo após a  $\tau$ -ésima iteração.



- Entretanto, percebam que ***ainda temos que encontrar os valores ideais para os hiperparâmetros***, nesse caso,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_\tau$  e  $\tau$ .

# Termo momentum

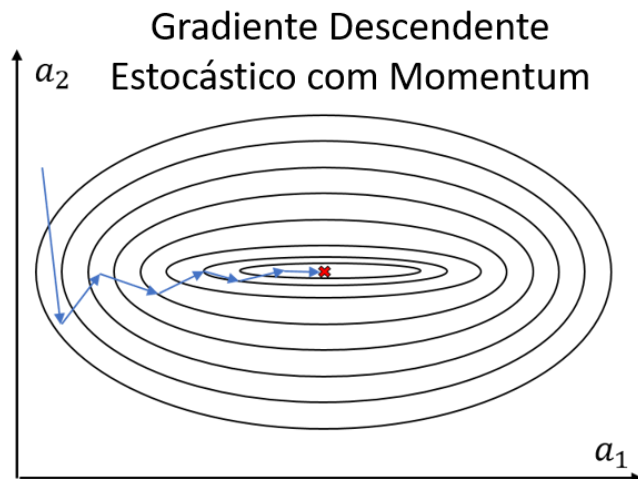
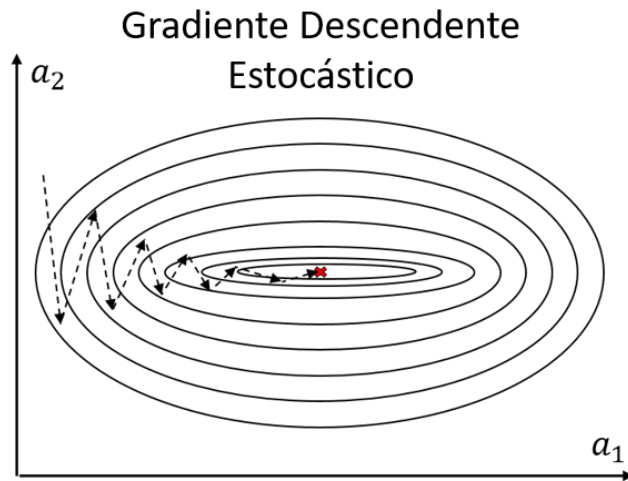


- Como vimos antes, o termo momentum adiciona uma **média movente de estimativas do vetor gradiente**,  $\mathbf{v}$ , à equação de atualização dos pesos, **tornando as atualizações menos ruidosas** e, consequentemente, **acelerando a convergência e aumentando a estabilidade** do algoritmo.

$$\mathbf{v}(i) = \mu \mathbf{v}(i-1) + (1-\mu) \nabla \hat{J}_e(\mathbf{w}(i)),$$
$$\mathbf{w}(i+1) = \mathbf{w}(i) - \alpha \mathbf{v}(i).$$

onde  $\nabla \hat{J}_e(\mathbf{w}(i))$  é a **estimativa do vetor gradiente** e  $\mu \in [0,1)$  (**coeficiente de momentum**) determina a quantidade de estimativas anteriores que são consideradas no cálculo da média.

# Termo momentum



- O termo momentum adiciona uma média das estimativas dos gradientes anteriores à atualização corrente.
  - Quando as **estimativas apontam na mesma direção** por várias iterações, o termo faz com que o tamanho dos passos dados naquela direção aumentem, ou seja, o **modelo ganha impulso**.
  - Quando as **estimativas mudam de direção** a cada nova iteração, o termo **suaviza as variações**.
  - Como resultado, temos **convergência mais rápida e oscilação reduzida**.
- A **desvantagem** é que nós precisamos encontrar os valores ideais dos **hiperparâmetros**  $\alpha$  e  $\mu$ .

# Momento de Nesterov

- O método do ***momento de Nesterov*** é uma variação do ***termo momentum*** em que o cálculo da ***estimativa do vetor gradiente*** não é feito em relação ao vetor de pesos atual,  $\mathbf{w}(i)$ , mas em ***relação ao próximo vetor de pesos***, ou seja, em relação ao valor do vetor de pesos após sua atualização com o termo momentum,

$$\mathbf{w}(i + 1) = \mathbf{w}(i) - \alpha \mathbf{v}(i).$$

- Essa mudança no cálculo da estimativa do vetor gradiente faz com que o ***momento de Nesterov*** apresente ***convergência mais rápida e ajustes mais precisos dos pesos*** do que o termo momentum, especialmente em regiões onde a ***superfície de erro se assemelha à forma de um vale***.

# Passo de aprendizagem adaptativo

- Na *variação adaptativa*, o passo de aprendizagem é *ajustado adaptativamente* de acordo com a *inclinação da superfície de erro*.
- Além disso, usa *passos de aprendizagem diferentes para cada peso* do modelo, *os atualizando de forma independente* de acordo com a inclinação da superfície na direção dos pesos.
- Assim, esses métodos são adequados para redes neurais, onde a *superfície de erro é bastante irregular e diferente em diferentes dimensões, tornando a atualização dos pesos mais efetiva*.
- Uma *vantagem* é que na maioria dos casos, *não é necessário se ajustar manualmente nenhum hiperparâmetro*.
- As técnicas mais conhecidas são RMSProp, AdaGrad e Adam.

# Inicialização dos pesos

- Um outro aspecto prático que é importante discutirmos é a *inicialização dos pesos de uma rede neural*.
- Como os métodos de treinamento de *redes neurais* são de *busca local*, eles dependem da *inicialização dos pesos*.
- Porém, a inicialização pode afetar drasticamente a qualidade da solução obtida.
- O *ponto de inicialização dos pesos* pode afetar a velocidade de convergência do algoritmo.
- Alguns *pontos de inicialização* fazem com que a rede alcance uma *boa solução mais rapidamente*, enquanto outros pontos podem levar a uma *convergência mais lenta* (e.g., algoritmo pode ser inicializado em um ponto de sela ou em uma região de platô).

# Inicialização dos pesos

- Alguns ***pontos de inicialização*** são tão instáveis que o algoritmo pode encontrar dificuldades numéricas (***underflow*** e ***overflow***), falhando completamente em convergir (***desaparecimento*** ou ***explosão*** dos gradientes).
- Uma questão importante da inicialização dos pesos é ***quebrar a simetria*** entre os ***nós***, ou seja, ***nós*** com a ***mesma função de ativação*** e ***conectados aos mesmos nós***, devem ter pesos iniciais diferentes, caso contrário, eles terão os mesmos pesos ao longo do treinamento (i.e., aprendem a mesma coisa).
- Portanto, como veremos a seguir, para ***quebrar a simetria e evitar problemas de convergência***, utilizamos algumas ***heurísticas de inicialização aleatória dos pesos***.

# Inicialização dos pesos

- Os pesos iniciais são tipicamente obtidos a partir de **distribuições gaussianas ou uniformes**, não importando muito qual delas é usada.
- No entanto, a **escala de variação da distribuição de inicialização dos pesos** tem um efeito significativo no **resultado da otimização** e, consequentemente, na **capacidade de generalização** da rede neural.
- Sendo assim, a **escala de variação** da inicialização dos pesos levanta algumas discussões.
- Distribuições com **grande escala variação** tendem a **reduzir o problema da simetria**, pois a probabilidade de valores iniciais bastante distintos é maior.



# Inicialização dos pesos

- Porém, se as **magnitudes dos valores iniciais forem muito grandes**, podemos ter problemas de **instabilidade**.
- Pesos com magnitudes muito grandes podem levar os **nós** com **funções de ativação** do tipo
  - Sigmoides a operarem na região de saturação, causando o **desaparecimento do gradiente**.
  - ReLU à **explosão do gradiente**.
- Por outro lado, distribuições com **escala de variação muito pequena** têm **maiores chances causar a simetria entre nós** e também podem apresentar **instabilidade ou lentidão** durante o treinamento.
  - Por exemplo, redes com **pesos muito pequenos e com nós usando função de ativação ReLU**, podem ter problemas com o **desaparecimento do gradiente**.
- Na sequência veremos algumas **heurísticas** para inicialização dos pesos.

# Heurísticas de inicialização dos pesos

- A ideia por trás destas heurísticas de inicialização dos pesos é **manter a média das ativações dos nós igual a zero e suas variâncias constantes ao longo das várias camadas da rede**, pois desta forma evita-se o desaparecimento ou a explosão do gradiente.
- Considerando uma camada com  $m$  entradas e  $n$  saídas, temos as seguintes **heurísticas** para inicializar os **pesos sinápticos\*** de seus nós.

Inicialização	Funções de ativação	Distribuição Uniforme $U(-r, r)$	Distribuição Normal $N(0, \sigma^2)$
Xavier/Glorot	Linear (i.e., nenhuma), Tanh, Logística, Softmax	$r = \sqrt{\frac{6}{m+n}}$	$\sigma^2 = \frac{2}{m+n}$
He	ReLU e suas variantes	$r = \sqrt{\frac{6}{m}}$	$\sigma^2 = \frac{2}{m}$
LeCun	SELU	$r = \sqrt{\frac{3}{m}}$	$\sigma^2 = \frac{1}{m}$

\*Em geral, inicializa-se os **pesos de bias** com **valores iguais a 0**, pois se mostra uma inicialização bastante eficiente na maioria dos casos.

# Redes neurais com a biblioteca SciKit-Learn



- A biblioteca SciKit-Learn **disponibiliza apenas dois tipos de arquiteturas** de redes neurais, MLP e **máquina de Boltzmann restrita**.
- A **máquina de Boltzmann** é implementada através da classe Bernoulli *restricted Boltzmann machine* (BernoulliRBM) e é usada para redução de dimensionalidade, classificação, geração de imagens, etc.
- Além disso, suas implementações **não são flexíveis** e **não se destinam a aplicações de larga escala**.
  - Por exemplo, a biblioteca *SciKit-Learn* não oferece suporte a GPUs.

# Redes neurais com a biblioteca SciKit-Learn

- Para implementações de ***modelos de aprendizado profundo*** escaláveis, muito mais rápidos, flexíveis e baseados em GPU, devemos utilizar bibliotecas como:
  - ***Tensorflow***: criada pela equipe *Google Brain* do *Google*.
  - ***PyTorch***: criada pela *Meta AI* (antigo *Facebook*).
  - ***Matlab***
  - ***MXNet***: criada pela *Apache*.
  - ***Caffe***: criada na universidade da Califórnia em Berkeley.
  - ***Theano***: criada pela Universidade de Montreal (primeira versão) e mantida posteriormente pela equipe de desenvolvedores do pacote PyMC sob o nome de Aesara.
  - Entre outras:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison\\_of\\_deep\\_learning\\_software](https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_deep_learning_software)

# Tarefas

- **Quiz:** “*T320 - Quiz – Redes Neurais Artificiais (Parte VII)*” que se encontra no MS Teams.
- **Projeto:** Projeto #2.
  - Projeto está no github e pode ser feito em grupos de no máximo 3 alunos.
  - **Entrega:** 22/06/2025 até às 23:59.
  - Leiam os enunciados atentamente.
  - Apenas um integrante do grupo precisa fazer a entrega.
  - **Mas não se esqueçam de colocar os nomes de todos os integrantes do grupo.**

Obrigado!



People with no idea  
about AI, telling me my  
AI will destroy the world



Me wondering why my  
neural network is  
classifying a cat as a dog..



## Deep Learning



What society thinks I do



What my friends think I do



What other computer  
scientists think I do



What mathematicians think I do

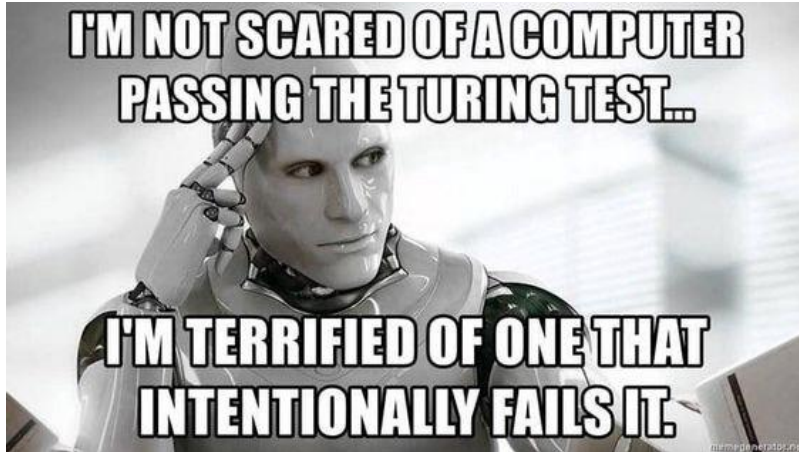


What I think I do

```
In [1]:  
import keras  
Using TensorFlow backend.
```

What I actually do

I'M NOT SCARED OF A COMPUTER  
PASSING THE TURING TEST...



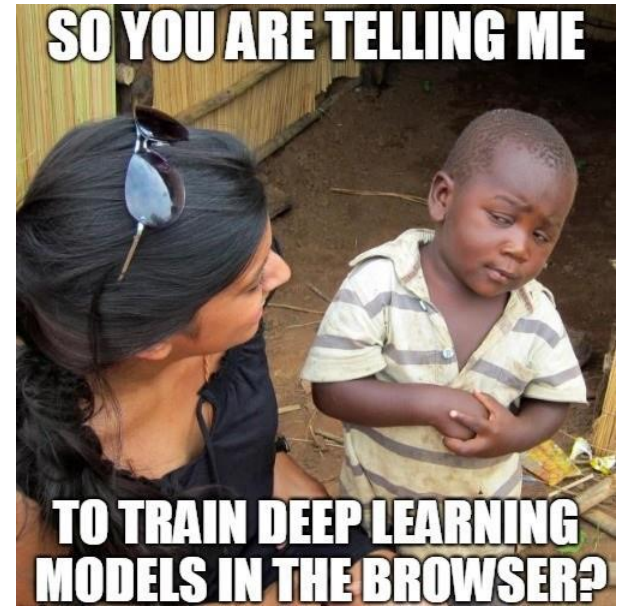
I'M TERRIFIED OF ONE THAT  
INTENTIONALLY FAILS IT.

Dog



I NEED GPU  
FOR MY DUMB  
NEURAL NETWORK

SO YOU ARE TELLING ME



TO TRAIN DEEP LEARNING  
MODELS IN THE BROWSER?

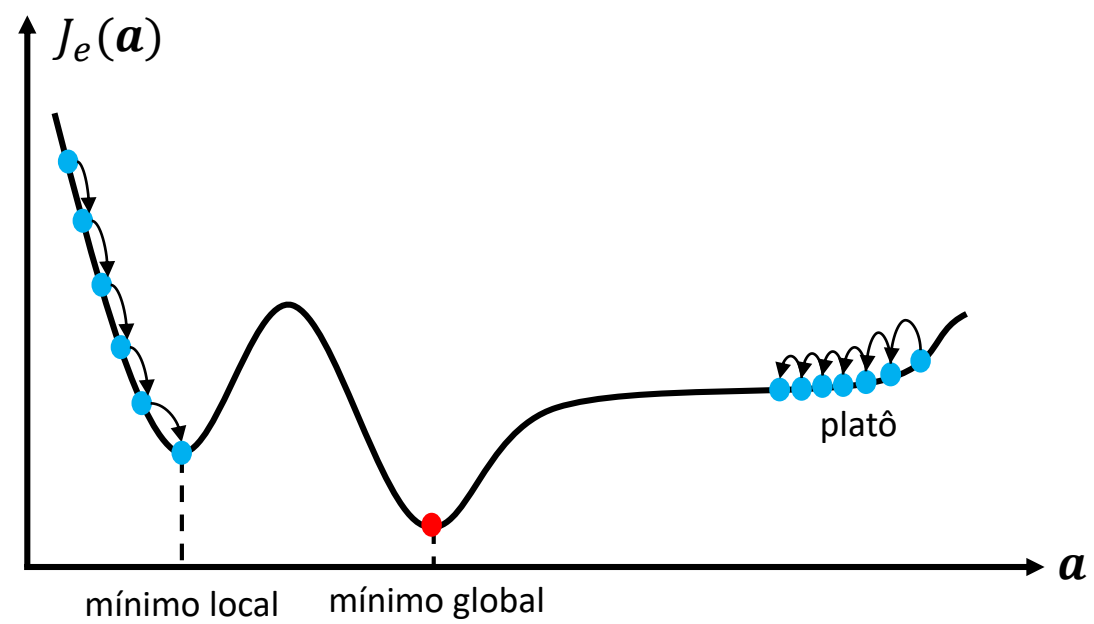
ONE DOES NOT SIMPLY



GENERATE MEMES USING DEEP  
LEARNING

Figuras





# Algumas visões práticas de algoritmos de aprendizado

**Versão Online**

$$\frac{\partial J(\mathbf{x}(n) | \mathbf{w}(k))}{\partial w_{i,j}^m} = \frac{1}{N_M} \sum_{j=1}^{N_M} \frac{\partial (d_j(n) - y_j(n) | \mathbf{w}(k))^2}{\partial w_{i,j}^m} = \frac{1}{N_M} \sum_{j=1}^{N_M} \frac{\partial e_j^2(n | \mathbf{w}(k))}{\partial w_{i,j}^m} = \nabla J_n(\mathbf{w}(k)).$$