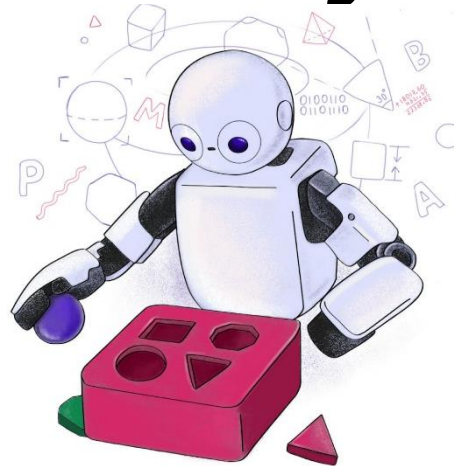


T320 - Introdução ao Aprendizado de Máquina II: *Redes Neurais Artificiais (Parte III)*



Inatel

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

Recapitulando

- Na última aula, fomos apresentados às redes neurais.
- Vimos que elas são formadas por camadas de perceptrons que se conectam através dos pesos sinápticos.
- Aprendemos que as funções de ativação sigmóide e tangente hiperbólica causam o problema do desaparecimento do gradiente, o qual é solucionado usando-se a função retificadora.
- Discutimos algumas topologias diferentes das redes neurais.
- E aprendemos que as redes neurais são aproximadoras universais de funções.
- Nesta aula, veremos como as redes neurais aprendem, ou seja, são treinadas.

Aprendizado em Redes Neurais

- Consideramos agora, o processo de otimização, ou seja, de atualização dos ***pesos sinápticos***.
- Assim como vimos anteriormente, o processo de otimização corresponde a um ***problema de minimização*** de uma ***função custo***, $J(\mathbf{w})$, com respeito a um vetor de pesos \mathbf{w} .
- Portanto, o problema de aprendizado em redes neurais pode ser formulado como

$$\min_{\mathbf{w}} J(\mathbf{w})$$

- Normalmente, esse processo de otimização é conduzido de forma iterativa, o que dá um sentido mais natural à noção de aprendizado (como um processo gradual).
- Existem vários métodos de otimização aplicáveis, mas, sem dúvida, os mais utilizados são aqueles baseados nas derivadas da função custo, $J(\mathbf{w})$.

Aprendizado em Redes Neurais

- Dentre esses métodos, existem os de ***primeira ordem*** e os de ***segunda ordem***.
- Os métodos de ***primeira ordem*** são baseados nas derivadas parciais de primeira ordem da ***função custo***, agrupadas no ***vetor gradiente***:

$$\nabla J(\mathbf{w}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial w_1} \\ \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial w_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial w_K} \end{bmatrix}$$

- Como já vimos, o gradiente aponta na direção de maior crescimento da função e portanto, caminhar em sentido contrário a ele é uma forma adequada de se buscar iterativamente a minimização da ***função de custo***.

Aprendizado em Redes Neurais

- Desta maneira, temos a seguinte **equação de atualização dos pesos**

$$\mathbf{w}(k + 1) \leftarrow \mathbf{w}(k) - \alpha \nabla J(\mathbf{w}(k)),$$

onde α é o **passo de aprendizagem** e k é a iteração de atualização.

- Já os métodos de **segunda ordem**, são baseados na informação trazida pela derivada parcial de segunda ordem da função custo. Essa informação está contida na **matriz Hessiana H** :

$$H(\mathbf{w}) = \nabla^2 J(\mathbf{w}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 J(\mathbf{w})}{\partial w_1^2} & \frac{\partial^2 J(\mathbf{w})}{\partial w_1 \partial w_2} & \cdots & \frac{\partial^2 J(\mathbf{w})}{\partial w_1 \partial w_K} \\ \frac{\partial^2 J(\mathbf{w})}{\partial w_2 \partial w_1} & \frac{\partial^2 J(\mathbf{w})}{\partial w_2^2} & \cdots & \frac{\partial^2 J(\mathbf{w})}{\partial w_2 \partial w_K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 J(\mathbf{w})}{\partial w_K \partial w_1} & \frac{\partial^2 J(\mathbf{w})}{\partial w_K \partial w_2} & \cdots & \frac{\partial^2 J(\mathbf{w})}{\partial w_K^2} \end{bmatrix}.$$

Aprendizado em Redes Neurais

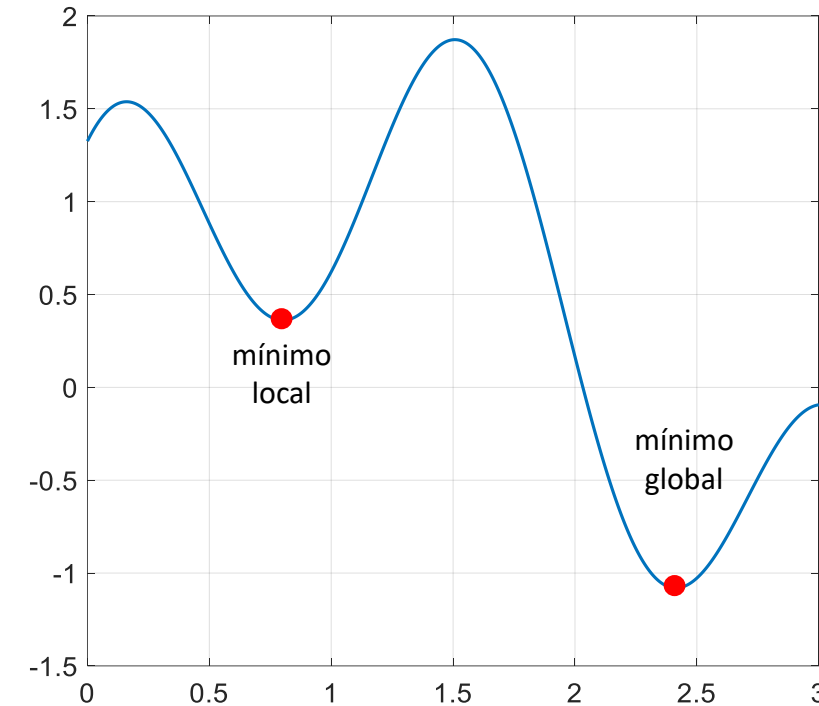
- De posse da **matriz hessiana**, é possível fazer uma aproximação de Taylor de segunda ordem da **função de custo**, o que leva à seguinte expressão para adaptação dos pesos:

$$\mathbf{w}(k + 1) \leftarrow \mathbf{w}(k) - \alpha \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{w}(k)) \nabla J(\mathbf{w}(k)).$$

- Essa expressão requer que a **matriz Hessiana** seja inversível e **definida positiva** a cada iteração, k , i.e., $\mathbf{z}^T \mathbf{H} \mathbf{z} > 0 \ \forall \mathbf{z} \neq \mathbf{0}$ (vetor nulo).
- A aproximação de Taylor com informação de segunda ordem é mais precisa que a fornecida por métodos de primeira ordem.
- Portanto, a tendência é que métodos de **segunda ordem** convirjam em menos passos que métodos de **primeira ordem**.
- Entretanto, o cálculo exato da **matriz Hessiana** pode ser complicado em vários casos práticos.
- Porém, há um conjunto de métodos de segunda ordem que evitam esse cálculo direto, como os métodos **quase-Newton** ou os métodos de **gradiente escalonado**.

Mínimos Locais, Globais, Pontos de Sela e Platôs

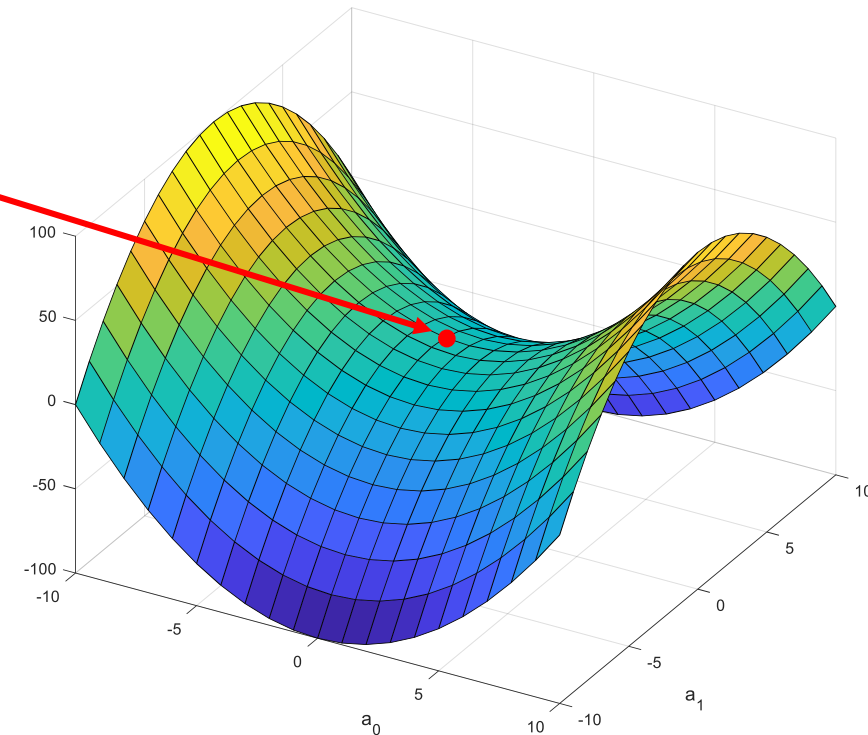
- É importante ressaltarmos que todos esses métodos são métodos de **busca local**, ou seja, eles têm convergência assegurada para **mínimos locais**.
- Para lembrarmos o que é um mínimo local, vejamos a figura ao lado onde existem dois mínimos:
 - Um deles é uma solução ótima em relação a seus vizinhos, ou seja, um **mínimo local**.
 - O outro também é uma solução ótima em relação a seus vizinhos (**mínimo local**), mas também em relação a todo o domínio considerado. Este é um **mínimo global**.
- Por serem formadas pela combinação de vários nós com funções de ativação não-lineares, as superfícies de erro de redes neurais não são convexas, portanto, pode-se ter vários mínimos locais.



Para muitos problemas envolvendo redes neurais, quase todos os mínimos locais têm um valor muito semelhante ao do mínimo global e, portanto, encontrar um mínimo local já é bom o suficiente.

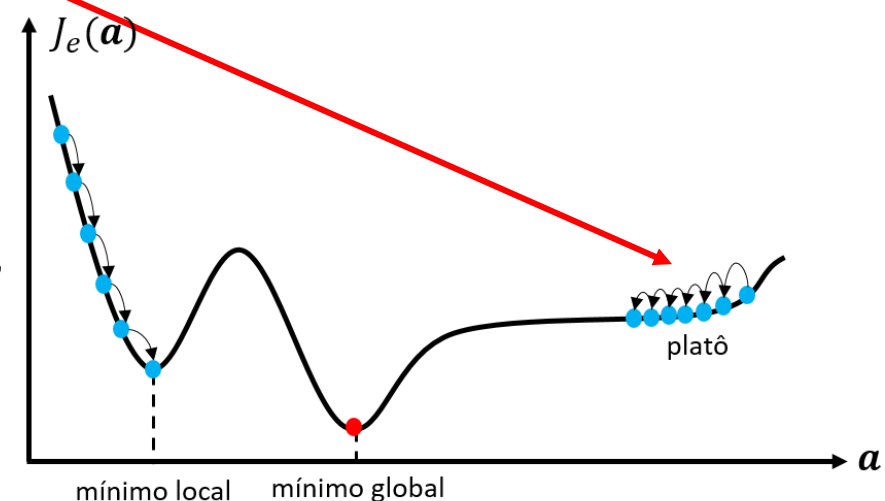
Mínimos Locais, Globais, Pontos de Sela e Platôs

- Outra irregularidade que podemos encontrar são os chamados ***pontos de sela***:
 - Um ponto que é um mínimo ao longo de um eixo, mas um máximo ao longo de outro.
- O algoritmo pode passar um longo período de tempo sendo atraído por eles, o que prejudica seu desempenho.
- Para escapar destes pontos, usa-se métodos de ***segunda ordem*** ou ***versões ruidosas do gradiente descendente***, como, por exemplo, o ***Gradiente Descendente Estocástico***.



Mínimos Locais, Globais, Pontos de Sela e Platôs

- Outro tipo de irregularidade são os **platôs**: regiões planas, mas com erro elevado.
 - Como a inclinação nesta região é próxima de zero (gradiente próximo de zero) o algoritmo pode levar muito tempo para atravessá-la.
- Para se escapar destas regiões, usa-se métodos de **aprendizado adaptativo** como AdaGrad, RMSProp, Adam, etc.
- Portanto, como garantir que o mínimo encontrado é bom o suficiente?
 - Treina-se o modelo várias vezes, sempre inicializando os **pesos aleatoriamente**, com a esperança de que em alguma dessas vezes ele inicialize mais próximo do mínimo global ou de um bom mínimo local.



Tarefa

- **Quiz:** “*T320 - Quiz – Redes Neurais Artificiais (Parte V)*” que se encontra no MS Teams.

Retropropagação do Erro

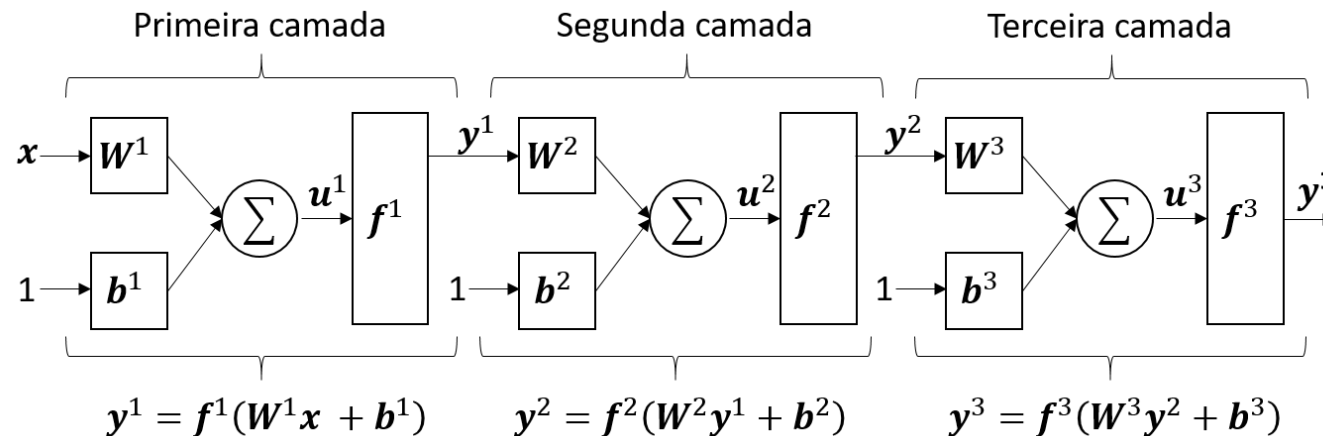
- Conforme nós discutimos anteriormente, os métodos fundamentais de ***aprendizado*** para ***redes neurais*** são baseados no cálculo das ***derivadas parciais*** da ***função de erro*** (ou de ***custo***) com relação aos ***pesos sinápticos***.
- Esses métodos buscam, fundamentalmente, encontrar o ***conjunto de pesos*** que minimize a ***medida de erro*** escolhida.
- A ideia é encontrar uma maneira de calcular o ***vetor gradiente*** da ***função de custo*** com respeito aos ***pesos sinápticos***.

Retropropagação do Erro

- Essa tarefa pode parecer óbvia, mas não é o caso.
- Foram necessários 17 anos desde a criação do **Perceptron** para que se “**descobrisse**” uma forma de treinar RNAs.
- Para que entendamos melhor o porquê, nós iremos considerar uma notação que será muito útil a seguir:
 - O peso $w_{i,j}^m$ corresponde ao j -ésimo peso do i -ésimo **nó** da m -ésima camada da **rede neural** e W^m é a matriz com todos os pesos da m -ésima camada.
 - $f^m(.)$ é a função de ativação da m -ésima camada da **rede neural**.
 - Com essa notação, obter o **vetor gradiente** significa calcular, de maneira genérica, $\frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial w_{i,j}^m}$, ou seja, calcular essa derivada para todos os pesos de todos os **nós**.

Retropropagação do Erro

- A figura abaixo apresenta um exemplo de como uma rede MLP pode ser descrita segundo essa notação.



- O mapeamento realizado pela rede MLP acima é dado por:

$$y^3 = f^3(W^3 f^2(W^2 f^1(W^1 x + b^1) + b^2) + b^3).$$

- Para facilitar nosso trabalho, iremos supor, sem nenhuma perda de generalidade, que a **função de custo** escolhida é o **erro quadrático médio** (MSE).

Retropropagação do Erro

- Nós vamos assumir que a última camada da rede MLP (denotada como a M -ésima camada) tenha uma quantidade genérica, N_M , de **nós**.

$$J(\mathbf{w}) = \frac{1}{N_{\text{dados}} N_M} \sum_{n=1}^{N_{\text{dados}}} \sum_{j=1}^{N_M} e_j^2(n)$$
$$= \frac{1}{N_{\text{dados}} N_M} \sum_{n=1}^{N_{\text{dados}}} \sum_{j=1}^{N_M} \left(d_j(n) - y_j^M(n) \right)^2,$$

onde $d_j(n)$ é o valor desejado da j -ésima saída (rótulo) correspondente ao n -ésimo exemplo de entrada.

- Devemos derivar a **função custo** com respeito aos **pesos**.
- Entretanto, os pesos não aparecem explicitamente na expressão de $J(\mathbf{w})$.

Retropropagação do Erro

- Para fazer com que a dependência dos pesos apareça de maneira clara na expressão acima, nós precisamos recorrer a aplicações sucessivas da **regra da cadeia**.
- Usando a notação de **Leibniz**, essa regra nos mostra que:

$$\frac{df(g(x))}{dx} = \frac{df(g(x))}{dg(x)} \frac{dg(x)}{dx}.$$

- Por exemplo, considerem que $f(g(x)) = e^{x^2}$ e que queremos obter $\frac{df(g(x))}{dx}$.
- Nós podemos fazer $g(x) = x^2$ e usar a **regra da cadeia**:

$$\frac{df(g(x))}{dx} = \frac{df(g(x))}{dg(x)} \frac{dg(x)}{dx} = e^{g(x)} 2x = 2xe^{x^2}.$$

Retropropagação do Erro

- Agora voltamos à equação do MSE e vemos que as saídas da última camada aparecem de maneira direta na equação.
- Isso significa que é simples se obter as derivadas com respeito aos pesos da camada de saída.
- Porém, quando precisamos avaliar as derivadas com respeito aos pesos das camadas anteriores, a situação fica mais complexa, pois não existe uma dependência direta.
- Portanto surge a pergunta, como podemos atribuir a cada **nó** de uma camada anterior da rede sua devida influência na composição dos valores de saída e do erro?
 - Propaga-se o erro calculado na saída da rede neural para suas camadas anteriores até a primeira camada intermediária usando-se um algoritmo, baseado na regra da cadeia, conhecido como **backpropagation** ou **retropropagação do erro**.

Retropropagação do Erro

- A seguir, veremos de maneira mais sistemática como a **retropropagação do erro** é realizada.
- Inicialmente, nós devemos observar um fato fundamental. O cálculo da derivada do MSE com respeito a um peso qualquer é dada por:

$$\frac{\partial J}{\partial w_{i,j}^m} = \frac{\partial \sum_{n=1}^{N_{\text{dados}}} \sum_{j=1}^{N_M} e_j^2(n)}{\partial w_{i,j}^m} = \sum_{n=1}^{N_{\text{dados}}} \sum_{j=1}^{N_M} \frac{\partial e_j^2(n)}{\partial w_{i,j}^m}.$$

- **OBS.1:** Operação da derivada parcial é distributiva.
- **OBS.2:** A divisão pelo número de amostras é omitida pois não afeta a otimização.
- A equação acima mostra que é necessário se calcular o gradiente apenas para a n -ésima amostra, pois o gradiente médio será uma média de **gradientes particulares** (ou **locais**) associados a cada amostra.

Retropropagação: Algumas noções básicas

- Considerando novamente a derivada geral $\frac{\partial J}{\partial w_{i,j}^m}$ (i.e., um elemento genérico do gradiente) e usando a **regra da cadeia**, podemos reescrevê-la como:

$$\frac{\partial J}{\partial w_{i,j}^m} = \frac{\partial J}{\partial u_i^m} \frac{\partial u_i^m}{\partial w_{i,j}^m}.$$

- A primeira derivada após a igualdade é a derivada da **função de custo** com respeito à ativação do i -ésimo **nó** da m -ésima camada.
- Essa grandeza será chamada de **sensibilidade** e é denotada pela letra grega δ .
- Desta forma:

$$\delta_i^m = \frac{\partial J}{\partial u_i^m}.$$

- O termo δ_i^m é único para cada **nó**.
- O outro termo, por sua vez, varia ao longo das entradas do **nó** em questão. Como adotamos o modelo do **tipo perceptron**, a ativação, u_i^m , é uma **combinação linear** das entradas:


$$u_i^m = \sum_{j \in \text{entradas}} w_{i,j}^m y_j^{m-1} + b_i^m$$

Retropropagação: Algumas noções básicas

- Assim

$$\frac{\partial u_i^m}{\partial w_{i,j}^m} = y_j^{m-1}.$$

Saída da
camada
anterior.



- Caso a derivada seja em relação ao termo de **bias**, b_i^m , teremos o seguinte resultado

$$\frac{\partial u_i^m}{\partial b_i^m} = 1.$$

- Desta forma, vemos que ***todas as derivadas da função de custo com respeito aos pesos sinápticos são produtos de um valor delta, δ_i^m , por uma entrada (ou, no caso dos termos de bias, pela unidade).***

$$\frac{\partial J}{\partial w_{i,j}^m} = \frac{\partial J}{\partial u_i^m} \frac{\partial u_i^m}{\partial w_{i,j}^m} = \delta_i^m y_j^{m-1},$$

Ou, para o termo de bias, b_i^m

$$\frac{\partial J}{\partial b_i^m} = \frac{\partial J}{\partial u_i^m} \frac{\partial u_i^m}{\partial b_i^m} = \delta_i^m.$$

- São os valores de **sensibilidade**, δ_i^m , que trazem mais dificuldades em seu cálculo, pois a derivada $\frac{\partial u_i^m}{\partial w_{i,j}^m}$ é trivial (ela é apenas o valor de uma entrada daquele nó).

Retropropagando o erro

- Portanto, a estratégia de otimização adotada para atualização dos pesos sinápticos da rede neural é a seguinte:
 1. Começa-se pela saída, onde o erro é calculado.
 2. Encontra-se uma **regra recursiva** que gere os valores de **sensibilidade** para os **nós** das camadas anteriores até a primeira camada intermediária.
- Esse processo é chamado de **retropropagação do erro** ou **backpropagation**.
- Para facilitar a **retropropagação do erro**, nós vamos inicialmente agrupar todos os valores δ_i^m de uma camada em um vetor δ^m .
- Em seguida, vamos encontrar uma regra que fará a transição $\delta^m \rightarrow \delta^{m-1}$.
- Ou seja, a partir da **sensibilidade** da camada m , iremos encontrar a **sensibilidade** da camada anterior, $m - 1$.

Retropropagando o erro

- Em resumo, o processo de **retropropagação do erro** é iniciado calculando-se o **vetor de sensibilidade** da última camada, δ^M , e, de maneira recursiva, obtém os **vetores de sensibilidade** de todas as camadas anteriores.
- Para calcular δ^M consideramos N_M saídas e, assim, temos que o i -ésimo elemento de δ^M é dado por:

$$\delta_i^M = \frac{\partial e_j^2}{\partial u_i^M} = \frac{\partial (d_j - y_j^M)^2}{\partial u_i^M} = -2(d_j - y_j^M) \frac{\partial y_j^M}{\partial u_i^M} = -2(d_j - y_j^M) f'^M(u_i^M),$$

onde

$$f'^M(u_i^M) = \frac{\partial f^M(u_i^M)}{\partial u_i^M}.$$

Retropropagando o erro

- Matricialmente podemos expressar δ^M como:

$$\delta^M = -2\mathbf{F}'^M(\mathbf{u}^M)(\mathbf{d} - \mathbf{y}),$$

onde a matriz $\mathbf{F}'^M(\mathbf{u}^M)$ é definida como

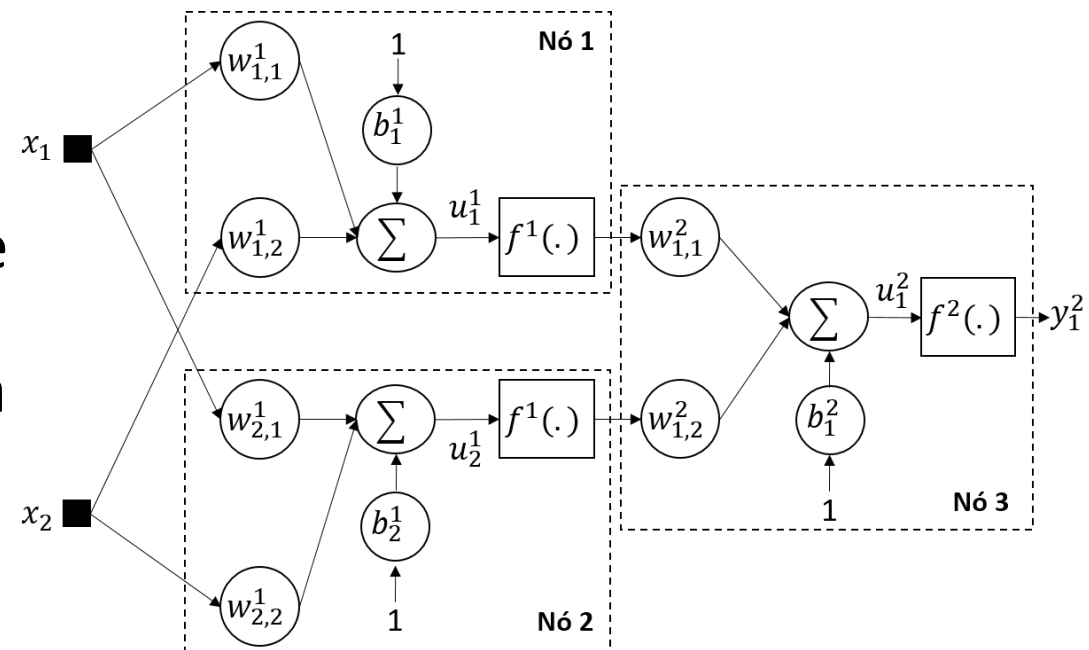
$$\mathbf{F}'^M(\mathbf{u}^M) = \begin{bmatrix} f'^M(u_1^M) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & f'^M(u_2^M) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & f'^M(u_{N_M}^M) \end{bmatrix}.$$

- Desta forma, a aplicação sucessiva da **regra da cadeia** leva a uma recursão que, em termos matriciais, é simples e dada por

$$\delta^m = \mathbf{F}'^m(\mathbf{u}^m)(\mathbf{W}^{m+1})^T \delta^{m+1}.$$

Exemplo da retropropagação do erro

- Considerem uma rede MLP com uma camada intermediária e uma camada de saída com um nó, portanto $M = 2$.
- Devemos começar calculando δ^2 .
- Percebam que essa **sensibilidade** é um escalar pois há apenas um **nó** na camada de saída.
- Vamos considerar um exemplo com entrada $\mathbf{x} = [x_1, x_2]$ e saída desejada d .
- Supomos que a rede tem uma certa configuração inicial de pesos, de modo que, quando a entrada for apresentada à rede, será possível calcular todos os sinais pertinentes ao longo dela até sua saída.
- Essa é a etapa **direta** (ou do inglês, **forward**).



Exemplo da retropropagação do erro

- Portanto, temos então a saída y_1^2 , onde o erro pode ser calculado como:

$$e = d - y_1^2.$$

- De posse do erro, podemos calcular o delta do **nó** da camada de saída:

$$\delta^2 = -2(d - y_1^2)f'^2(u_1^2).$$

- Temos, portanto, nossa primeira **sensibilidade**. Agora, usamos a recursão para **retropropagar** o erro até a camada anterior. A fórmula nos diz:

$$\delta^1 = \mathbf{F}'^1(\mathbf{u}^1)(\mathbf{W}^2)^T \delta^2,$$

onde $(\mathbf{W}^2)^T = [w_{1,1}^2, w_{1,2}^2]^T$ e

$$\mathbf{F}'^1(\mathbf{u}^1) = \begin{bmatrix} f'^1(u_1^1) & 0 \\ 0 & f'^1(u_2^1) \end{bmatrix}.$$

OBS.: Notem que $.^2$ aqui não significa “ao quadrado”, mas sim a indicação de que se trata de uma saída da camada $m = 2$.

Exemplo da retropropagação do erro

- Portanto,

$$\delta^1 = \begin{bmatrix} w_{1,1}^2 f'^1(u_1^1) \\ w_{1,2}^2 f'^1(u_2^1) \end{bmatrix} \delta^2.$$

- Agora, para calcularmos o gradiente, multiplicamos as **sensibilidades** pelas entradas correspondentes.
- Por exemplo, as derivadas parciais com relação aos pesos do **nó** $i = 1$ da camada $m = 1$ são mostradas abaixo

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial J}{\partial w_{1,1}^1} \\ \frac{\partial J}{\partial w_{1,2}^1} \\ \frac{\partial J}{\partial b_1^1} \end{bmatrix} = -2(d - y_1^2) f'^2(u_1^2) w_{1,1}^2 f'^1(u_1^1) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Os pesos de **bias** estão ligados a entradas com valores constantes iguais a 1.

Exemplo da retropropagação do erro

- Se fôssemos calcular as derivadas aplicando a regra da cadeia diretamente, elas seriam calculadas como mostrado abaixo.

$$\begin{aligned}\frac{\partial J}{\partial w_{1,1}^1} &= \frac{\partial e^2}{\partial w_{1,1}^1} = \frac{\partial \left(d - f^2(u_1^2) \right)^2}{\partial f^2(u_1^2)} \frac{\partial f^2(u_1^2)}{\partial u_1^2} \frac{\partial u_1^2}{\partial f^1(u_1^1)} \frac{\partial f^1(u_1^1)}{\partial u_1^1} \frac{\partial u_1^1}{\partial w_{1,1}^1} \\ \frac{\partial J}{\partial w_{1,2}^1} &= \frac{\partial e^2}{\partial w_{1,2}^1} = \frac{\partial \left(d - f^2(u_1^2) \right)^2}{\partial f^2(u_1^2)} \frac{\partial f^2(u_1^2)}{\partial u_1^2} \frac{\partial u_1^2}{\partial f^1(u_1^1)} \frac{\partial f^1(u_1^1)}{\partial u_1^1} \frac{\partial u_1^1}{\partial w_{1,2}^1} \\ \frac{\partial J}{\partial b_1^1} &= \frac{\partial e^2}{\partial b_1^1} = \frac{\partial \left(d - f^2(u_1^2) \right)^2}{\partial f^2(u_1^2)} \frac{\partial f^2(u_1^2)}{\partial u_1^2} \frac{\partial u_1^2}{\partial f^1(u_1^1)} \frac{\partial f^1(u_1^1)}{\partial u_1^1} \frac{\partial u_1^1}{\partial b_1^1}\end{aligned}$$

Tarefas

- **Quiz:** “*T320 - Quiz – Redes Neurais Artificiais (Parte VI)*” que se encontra no MS Teams.
- **Exercício Prático:** [Laboratório #8](#).
 - Pode ser baixado do MS Teams ou do GitHub.
 - Pode ser respondido através do link acima (na nuvem) ou localmente.
 - [Instruções para resolução e entrega dos laboratórios](#).
 - **Atividades podem ser feitas em grupo, mas as entregas devem ser individuais.**

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



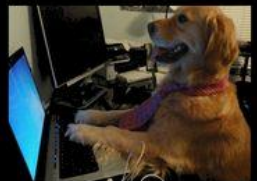
What society thinks I do



What my friends think I do



What other computer
scientists think I do



What mathematicians think I do

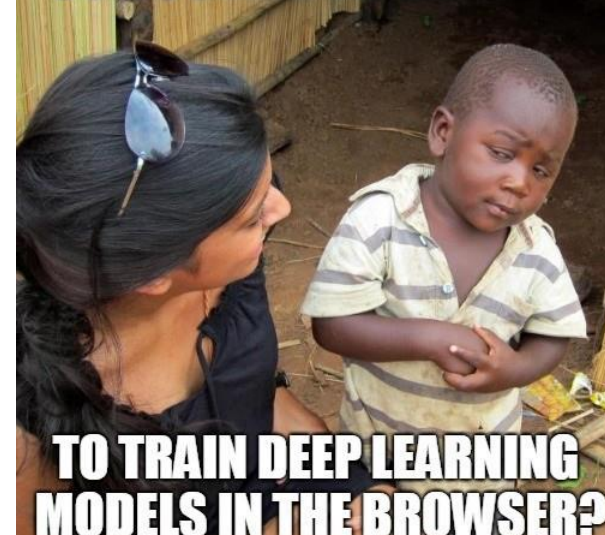


What I think I do



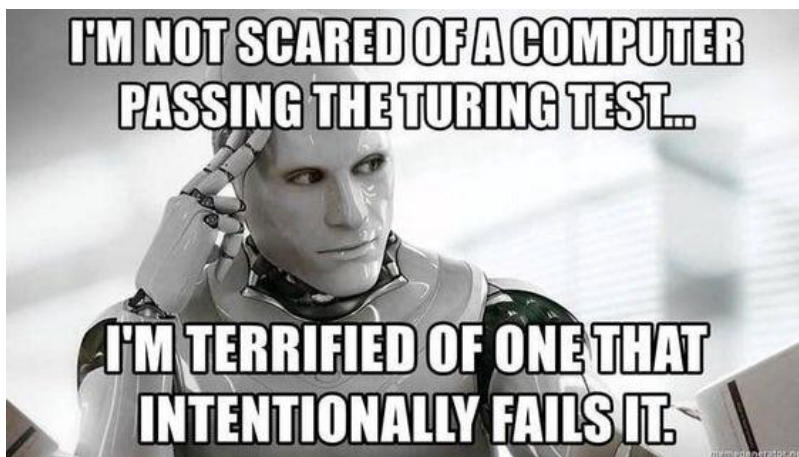
What I actually do

SO YOU ARE TELLING ME



**TO TRAIN DEEP LEARNING
MODELS IN THE BROWSER?**

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



**I'M TERRIFIED OF ONE THAT
INTENTIONALLY FAILS IT.**

Dog



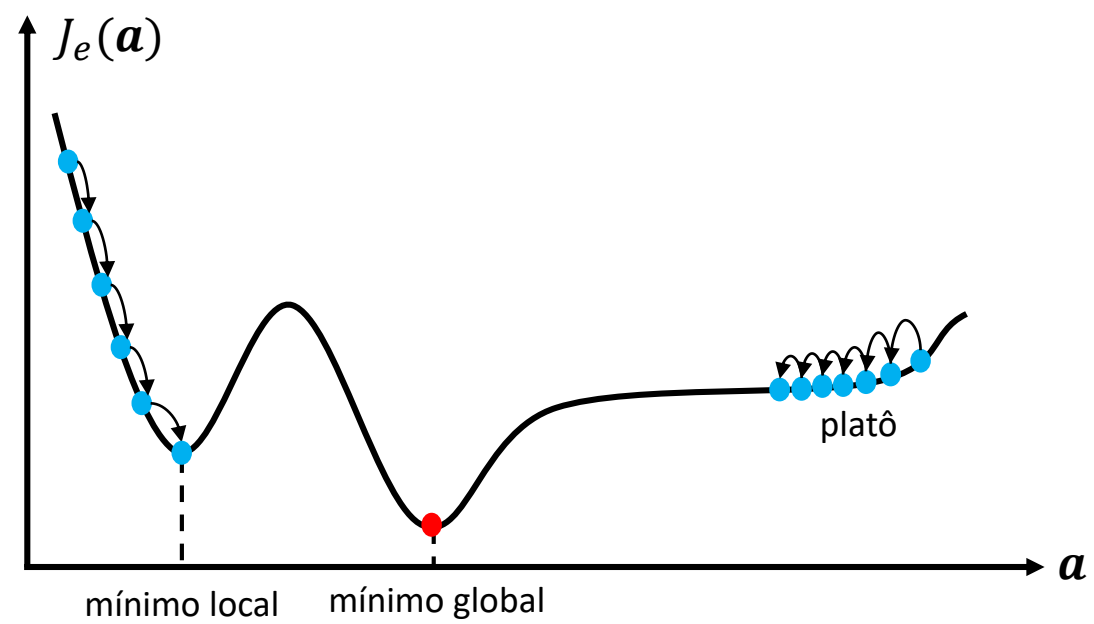
**I NEED GPU
FOR MY DUMB
NEURAL NETWORK**

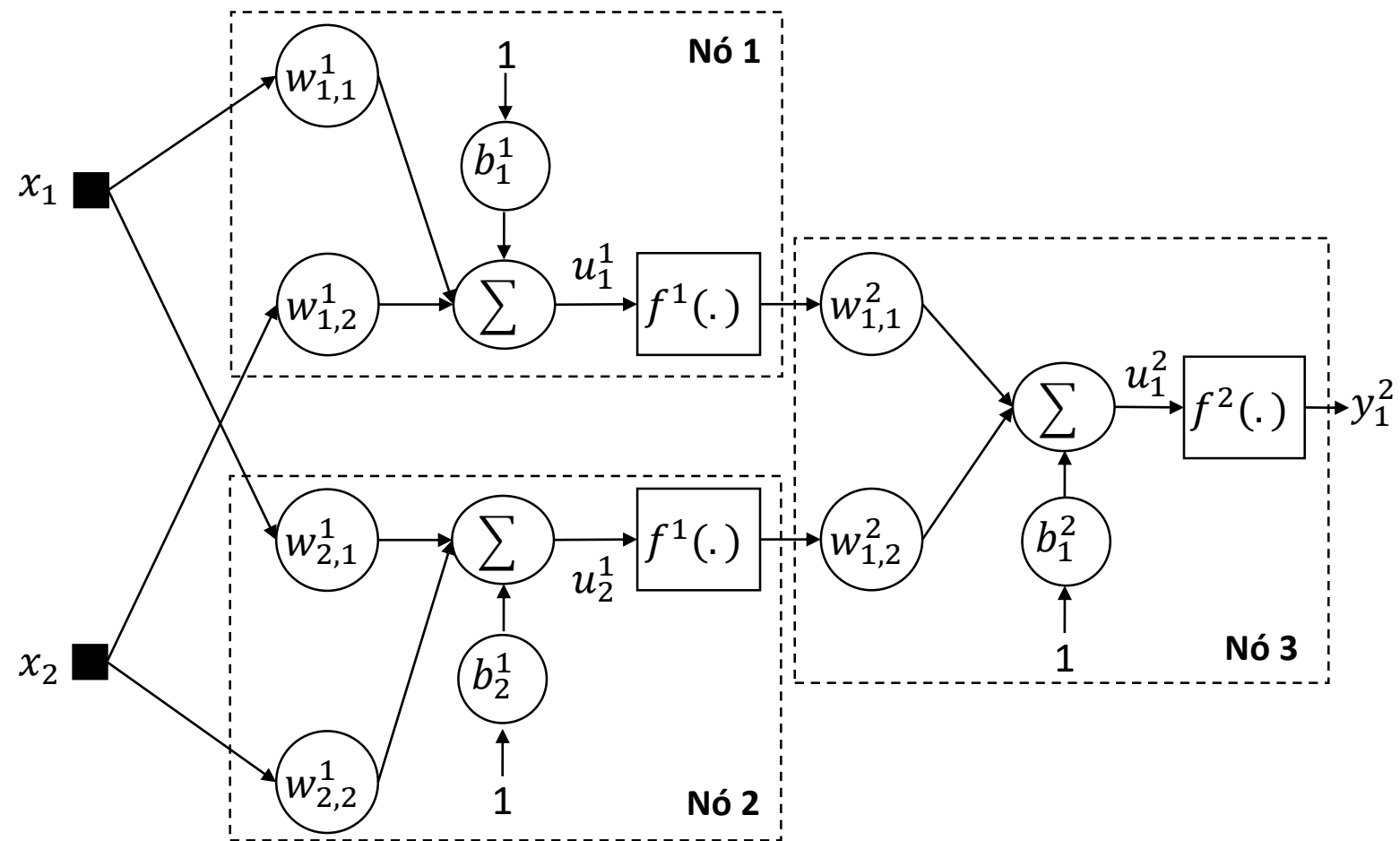
ONE DOES NOT SIMPLY

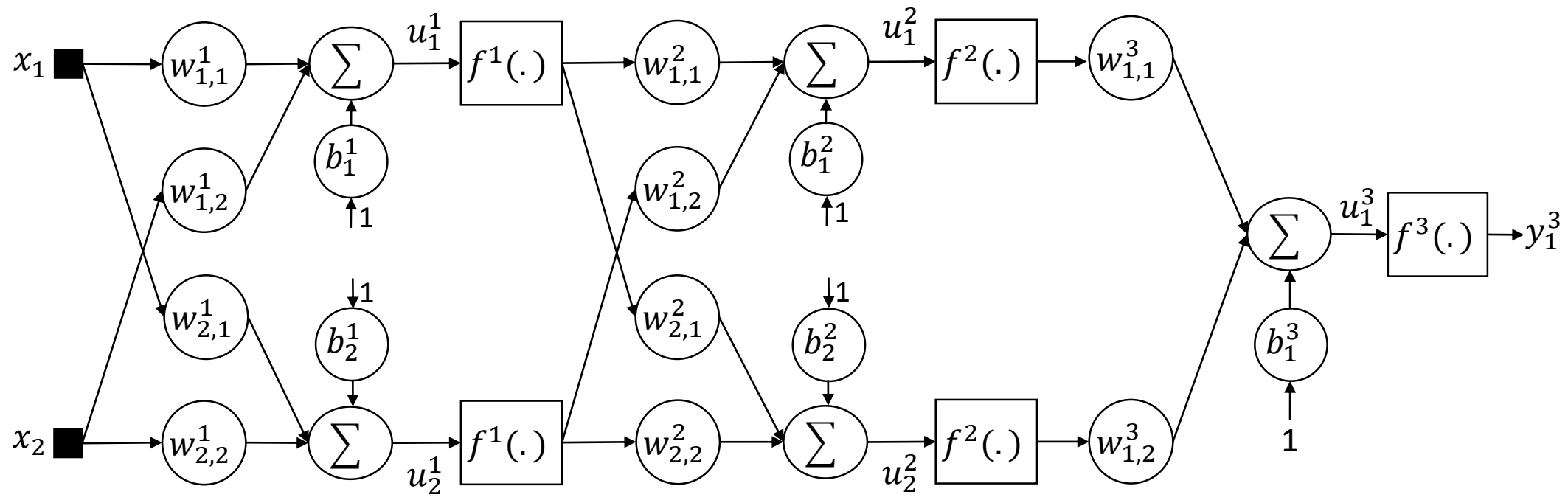


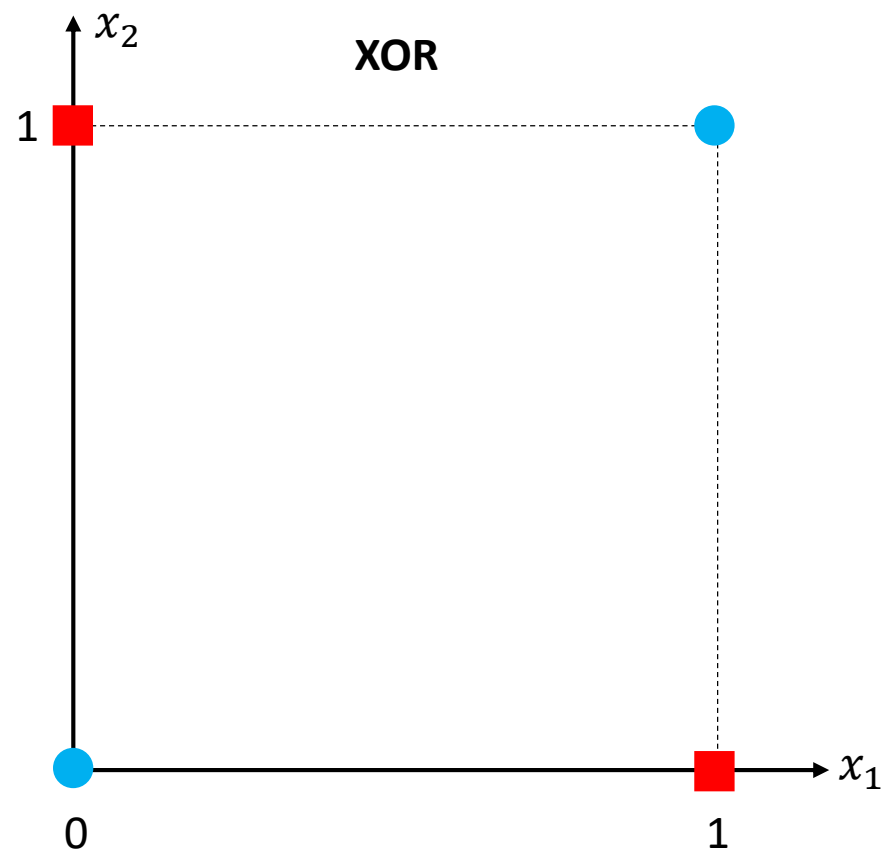
**GENERATE MEMES USING DEEP
LEARNING**

Figuras









● Classe 0 (nível lógico 0)

■ Classe 1 (nível lógico 1)