

# Reti neurali

## Il cervello artificiale (ma molto semplificato)

Le reti neurali sono ispirate al cervello umano, ma attenzione: sono una **semplificazione estrema**. Il cervello ha 86 miliardi di neuroni. Le reti neurali che vedremo ne hanno... qualche decina. Ma funzionano comunque sorprendentemente bene!

## Il neurone biologico vs artificiale

Biologico	Artificiale
Dendriti ricevono segnali	Input (i dati)
Sinapsi hanno diversa "forza"	Pesi (weights)
Soma elabora i segnali	Somma pesata + bias
Assone trasmette il risultato	Funzione di attivazione → output

Il neurone artificiale fa una cosa semplice:

1. Prende gli input
2. Li moltiplica per i pesi
3. Somma tutto (+ un bias)
4. Passa il risultato attraverso una funzione di attivazione

Formula: `output = attivazione(w1*x1 + w2*x2 + ... + bias)`

## Il Perceptrone

Il **perceptrone** è il neurone artificiale più semplice: un singolo neurone che prende decisioni binarie (sì/no, 0/1). Proviamo a farlo funzionare come una porta logica AND:

```
import numpy as np

# Porta AND: entrambi gli input devono essere 1
dati_and = [
    ([0, 0], 0),
    ([0, 1], 0),
    ([1, 0], 0),
    ([1, 1], 1),
]

# Perceptrone
np.random.seed(42)
pesi = np.random.randn(2) * 0.5
bias = 0.0
lr = 0.1

def step(x):
    """Funzione di attivazione: 1 se x >= 0, altrimenti 0"""
    return 1 if x >= 0 else 0

# Addestramento
print("Addestramento del perceptrone (AND):")
for epoca in range(20):
    errori = 0
    for inputs, target in dati_and:
        x = np.array(inputs)
        # Forward: calcola l'output
        somma = np.dot(x, pesi) + bias
        output = step(somma)

        # Calcola l'errore
        errore = target - output
        if errore != 0:
            errori += 1
            # Aggiorna pesi e bias
            pesi += lr * errore * x
            bias += lr * errore

    if epoca % 5 == 0:
```

```
        print(f"  Epoca {epoca:2}: errori={errori}, pesi={pesi.round(2)}")
    if errori == 0:
        print(f"  Epoca {epoca:2}: CONVERGENZA! Zero errori!")
        break

# Test
print(f"
Risultati finali:")
print(f"Pesi: {pesi.round(3)}, Bias: {bias:.3f}
")
for inputs, target in dati_and:
    x = np.array(inputs)
    output = step(np.dot(x, pesi) + bias)
    ok = "OK" if output == target else "ERRORE"
    print(f"  {inputs[0]} AND {inputs[1]} = {output}  (atteso: {target})")
```

!!! tip "Prova anche OR"

Cambia `dati\_and` con i dati della porta OR e vedrai che il perceptrone

---

## Funzioni di attivazione

---

La funzione di attivazione decide se il neurone "si attiva" o no. Ce ne sono diverse, ognuna con le sue caratteristiche:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

x = np.linspace(-5, 5, 100)

# Sigmoid: schiaccia tutto tra 0 e 1
sigmoid = 1 / (1 + np.exp(-x))

# ReLU: semplice ma potente
relu = np.maximum(0, x)

# Tanh: come sigmoid ma tra -1 e 1
tanh = np.tanh(x)

fig, axes = plt.subplots(1, 3, figsize=(14, 4))

axes[0].plot(x, sigmoid, 'b-', linewidth=2)
axes[0].set_title('Sigmoid')
axes[0].grid(True, alpha=0.3)
axes[0].axhline(y=0.5, color='gray', linestyle='--', alpha=0.5)

axes[1].plot(x, relu, 'r-', linewidth=2)
axes[1].set_title('ReLU')
axes[1].grid(True, alpha=0.3)

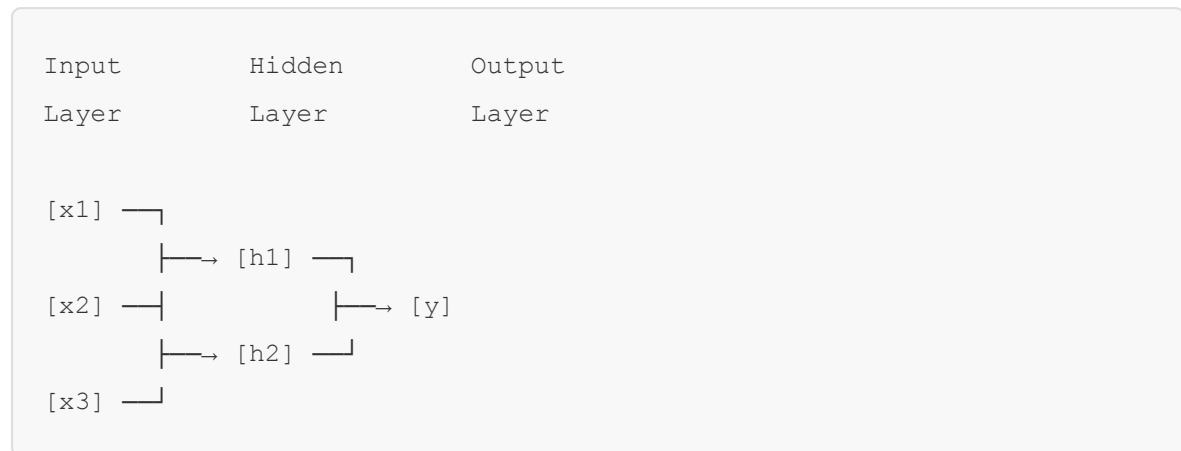
axes[2].plot(x, tanh, 'g-', linewidth=2)
axes[2].set_title('Tanh')
axes[2].grid(True, alpha=0.3)
axes[2].axhline(y=0, color='gray', linestyle='--', alpha=0.5)

plt.suptitle('Funzioni di attivazione', fontsize=14)
plt.tight_layout()
plt.show()

print("Sigmoid: output tra 0 e 1 (perfetta per probabilita')")
print("ReLU: la piu' usata nelle reti moderne (semplice e veloce)")
print("Tanh: output tra -1 e 1 (a volte meglio della sigmoid)")
```

## Una rete neurale: il forward pass

Una rete neurale ha più **strati** (layers) di neuroni:



Il **forward pass** è il calcolo che va dagli input all'output: moltiplica per i pesi, somma, attiva, ripeti per ogni strato.

```
import numpy as np

def sigmoid(x):
    return 1 / (1 + np.exp(-x))

# Rete semplice: 2 input → 3 neuroni nascosti → 1 output
np.random.seed(42)

# Pesi casuali
W1 = np.random.randn(2, 3) # 2 input → 3 neuroni nascosti
b1 = np.zeros(3)
W2 = np.random.randn(3, 1) # 3 neuroni nascosti → 1 output
b2 = np.zeros(1)

# Input di esempio
x = np.array([0.5, 0.8])

# Forward pass (passo per passo!)
print("FORWARD PASS")
print(f"Input: {x}")

# Strato nascosto
z1 = np.dot(x, W1) + b1
print(f"Strato nascosto (prima di attivazione): {z1.round(3)}")
a1 = sigmoid(z1)
print(f"Strato nascosto (dopo sigmoid): {a1.round(3)}")

# Strato output
z2 = np.dot(a1, W2) + b2
print(f"Strato output (prima di attivazione): {z2.round(3)}")
a2 = sigmoid(z2)
print(f"Strato output (dopo sigmoid): {a2.round(3)}")

print(f"Output finale: {a2[0]:.4f}")
print("(Con pesi casuali l'output e' casuale. Ora dobbiamo ADDESTRARE!)"
```

---

## Backpropagation (l'idea)

---

Il forward pass calcola l'output. Ma come si aggiornano i pesi per migliorare? Con la **backpropagation** (retropropagazione dell'errore).

L'idea: tipo accordare una chitarra.

1. Suoni una nota → senti che è stonata (calcoli l'errore)
2. Giri la chiavetta un pochino (aggiusti i pesi)
3. Suoni di nuovo → meno stonata!
4. Ripeti finché non è intonata

In termini tecnici: si calcola quanto ogni peso ha contribuito all'errore, e si aggiusta proporzionalmente. È calcolo differenziale applicato (ma non preoccuparti, lo fa il computer!).

---

## Rete neurale completa: il problema XOR

---

Ecco il grande momento: una rete neurale addestrata da zero con numpy! Risolviamo XOR, il problema che un singolo perceptrone non poteva risolvere:

```
import numpy as np

def sigmoid(x):
    return 1 / (1 + np.exp(-x))

def sigmoid_derivata(x):
    return x * (1 - x)

# Dataset XOR
X = np.array([[0, 0], [0, 1], [1, 0], [1, 1]])
y = np.array([[0], [1], [1], [0]])

# Inizializza pesi casuali
np.random.seed(42)
W1 = np.random.randn(2, 4)    # 2 input → 4 neuroni nascosti
b1 = np.zeros((1, 4))
W2 = np.random.randn(4, 1)    # 4 neuroni nascosti → 1 output
b2 = np.zeros((1, 1))

lr = 1.0
epoche = 5000

print("Addestramento rete neurale su XOR:")
print(f"Struttura: 2 → 4 → 1")
print(f"{'Epoca':>6} {'Loss':>10}")
print("-" * 18)

for epoca in range(epoche):
    # Forward pass
    z1 = np.dot(X, W1) + b1
    a1 = sigmoid(z1)
    z2 = np.dot(a1, W2) + b2
    a2 = sigmoid(z2)

    # Calcola l'errore (loss)
    loss = np.mean((y - a2) ** 2)

    # Backpropagation
    d2 = (a2 - y) * sigmoid_derivata(a2)
```



```
d1 = np.dot(d2, W2.T) * sigmoid_derivata(a1)

# Aggiorna pesi
W2 -= lr * np.dot(a1.T, d2)
b2 -= lr * np.sum(d2, axis=0, keepdims=True)
W1 -= lr * np.dot(X.T, d1)
b1 -= lr * np.sum(d1, axis=0, keepdims=True)

if epoca % 1000 == 0:
    print(f"{epoca:>6} {loss:>10.6f}")

print(f"{epoche:>6} {loss:>10.6f}")

# Test
print(f"
Risultati finali:")
for i in range(4):
    output = a2[i][0]
    print(f"    {X[i][0]} XOR {X[i][1]} = {output:.4f}    (arrotondato: {rou

print("
Funziona! Il perceptrone singolo non poteva, la rete a 2 strati SI!")
```

---

## MLPClassifier di scikit-learn

---

Scrivere la rete a mano è educativo, ma per progetti veri usiamo `MLPClassifier` di sklearn:

```

import numpy as np
from sklearn.neural_network import MLPClassifier
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import accuracy_score

np.random.seed(42)

# Dataset piu' complesso
n = 200
ore = np.concatenate([np.random.normal(7, 1.5, n//2), np.random.normal(3, 1.5, n//2)])
voti_prec = np.concatenate([np.random.normal(7.5, 1, n//2), np.random.normal(6.5, 1, n//2)])
etichette = np.array([1] * (n//2) + [0] * (n//2))
X = np.column_stack([ore, voti_prec])
y = etichette

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# Rete neurale con sklearn (molto piu' semplice!)
mlp = MLPClassifier(
    hidden_layer_sizes=(10, 5), # 2 strati nascosti: 10 e 5 neuroni
    max_iter=1000,
    random_state=42
)
mlp.fit(X_train, y_train)

acc = accuracy_score(y_test, mlp.predict(X_test))
print(f"Accuracy: {acc:.2%}")
print(f"Struttura: {X.shape[1]} → 10 → 5 → 1")
print(f"Epoche usate: {mlp.n_iter_}")

```

!!! warning "Perche' non usiamo solo numpy?"

Scrivere reti neurali a mano e' perfetto per capire COME funzionano. Ma

- **\*\*Auto-differenziazione\*\***: calcolano i gradienti automaticamente
- **\*\*GPU\*\***: sfruttano la scheda video per velocizzare tutto
- **\*\*Reti pre-addestrate\*\***: puoi partire da modelli gia' addestrati su mi

## Esercizi

---

### Esercizio 1: Porte logiche

Modifica il perceptrone per imparare la porta OR e la porta NAND. Funziona per tutte?

```
import numpy as np

# Dati OR
dati_or = ([0, 0], 0), ([0, 1], 1), ([1, 0], 1), ([1, 1], 1)]

# Dati NAND
dati_nand = ([0, 0], 1), ([0, 1], 1), ([1, 0], 1), ([1, 1], 0)]

# Addestra un perceptrone per ogni porta
```

### Esercizio 2: Rete neurale personalizzata

Modifica la rete neurale numpy per avere 8 neuroni nello strato nascosto invece di 4. Converge piu' velocemente o piu' lentamente?

```
import numpy as np

# Modifica la rete XOR con 8 neuroni nascosti

# Confronta la velocita' di convergenza
```

### Esercizio 3: MLPClassifier tuning

Prova diverse configurazioni di MLPClassifier (numero di strati, neuroni, learning rate) e trova quella con l'accuracy migliore usando cross-validation.

```
import numpy as np
from sklearn.neural_network import MLPClassifier
from sklearn.model_selection import cross_val_score

np.random.seed(42)

# Crea il dataset

# Prova diverse configurazioni

# Stampa i risultati e trova la migliore
```