AES: Advanced Encryption Standard

La Crittografia Simmetrica Moderna

Prof. Massimo

IIS Fermi Sacconi Ceci - Ascoli Piceno

January 7, 2026

Contenuti

1. Introduzione alla Crittografia
2. Storia e Contesto di AES
3. Struttura di AES
4. Le Quattro Operazioni di AES
5. Key Expansion
6. Decifratura
7. Modi di Operazione
8. Sicurezza di AES
9. Applicazioni Pratiche
10. Conclusioni

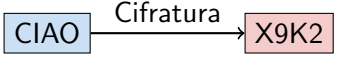
Cos'è la Crittografia?

Definizione

La **crittografia** è la scienza che studia le tecniche per rendere un messaggio incomprensibile a persone non autorizzate.

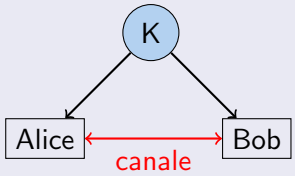
Obiettivi principali:

- Confidenzialità: solo destinatari autorizzati possono leggere
- Integrità: il messaggio non è stato modificato
- Autenticità: verifica dell'identità del mittente



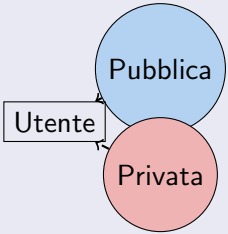
Tipi di Crittografia

Crittografia Simmetrica



Stessa chiave per cifrare e decifrare
Esempi: AES, DES, 3DES
Veloce ed efficiente

Crittografia Asimmetrica



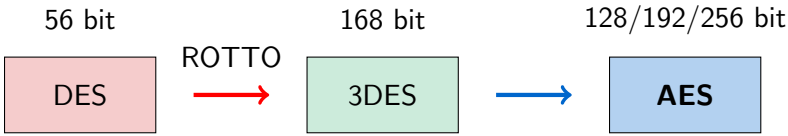
Chiavi diverse: pubblica e privata
Esempi: RSA, ECC
Più lenta ma non richiede scambio sicuro

AES è un algoritmo di crittografia simmetrica

Prima di AES: Il DES

DES - Data Encryption Standard (1977)

- Sviluppato da IBM, standardizzato da NIST
- Chiave di **56 bit** (troppo corta!)
- Blocchi di 64 bit
- Negli anni '90 diventa vulnerabile agli attacchi brute force



3DES: soluzione temporanea (applica DES tre volte)
Necessità: nuovo standard più sicuro e veloce

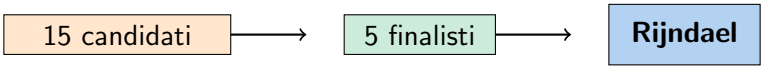
La Nascita di AES

Concorso NIST (1997-2000)

Il NIST (National Institute of Standards and Technology) bandisce un concorso pubblico per trovare un successore del DES

Requisiti:

- Crittografia a blocchi simmetrica
- Lunghezza blocco: 128 bit
- Lunghezze chiave: 128, 192, 256 bit
- Sicurezza superiore a 3DES
- Efficienza su varie piattaforme



Vincitore (2000): Rijndael, sviluppato dai crittografi belgi Joan Daemen e Vincent Rijmen

Caratteristiche di AES

Parametri Fondamentali

- **Tipo:** Cifrario a blocchi
- **Dimensione blocco:** 128 bit (16 byte)
- **Dimensioni chiave:**
  - AES-128: 128 bit (10 round)
  - AES-192: 192 bit (12 round)
  - AES-256: 256 bit (14 round)

Vantaggi

- Altamente sicuro
- Veloce ed efficiente
- Flessibile
- Standard mondiale

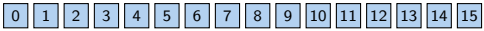
Utilizzi:

- Wi-Fi (WPA2/WPA3)
- HTTPS/TLS
- VPN
- Crittografia disco
- Messaggistica sicura

Come AES Rappresenta i Dati

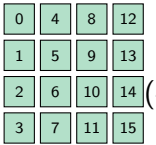
La Matrice di Stato (State Matrix)

I 16 byte del blocco sono organizzati in una matrice 4×4



128 bit = 16 byte

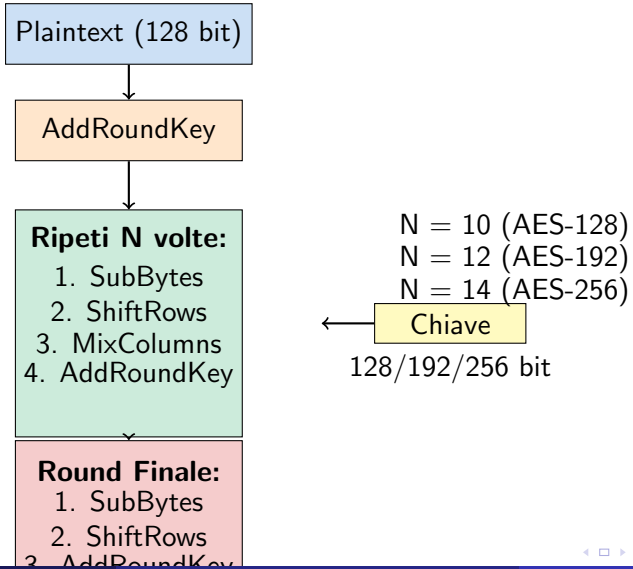
riorganizzazione



Matrice di Stato
(4 righe $\times$ 4 colonne)

Nota: I byte sono disposti *per colonna*, non per riga!

Schema Generale di AES



1. SubBytes - Sostituzione

Obiettivo

Sostituire ogni byte della matrice con un altro byte usando una tabella speciale chiamata **S-Box** (Substitution Box)

Come funziona:

1. Prendi un byte (es. 0x53)
2. Dividi in due nibble: 5 e 3
3. Usa 5 come riga, 3 come colonna
4. Il valore nella S-Box è il byte sostituito

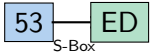
Proprietà:

- Non lineare (confusione)
- Iniettiva (ogni input $\rightarrow$ output unico)
- Basata su matematica in $GF(2^8)$

S-Box Semplificata (4×4)

	0	1	2	3
0	63	7C	77	7B
1	F2	6B	6F	C5
2	30	01	67	2B
3	FE	D7	AB	76

Esempio:



2. ShiftRows - Spostamento Righe

Obiettivo

Spostare ciclicamente i byte di ogni riga verso sinistra di un numero fisso di posizioni

Prima:

0	4	8	12
1	5	9	13
2	6	10	14
3	7	11	15

Dopo:

0	4	8	12
5	9	13	1
10	14	2	6
15	3	7	11

Spostamenti:

- Riga 0: 0 posizioni (nessuno spostamento)
- Riga 1: 1 posizione a sinistra
- Riga 2: 2 posizioni a sinistra
- Riga 3: 3 posizioni a sinistra

Effetto: Diffonde i byte tra le colonne (*diffusione*)

3. MixColumns - Mescolamento Colonne

Obiettivo

Mescolare i byte all'interno di ogni colonna usando operazioni matematiche in $GF(2^8)$

Operazione: Moltiplicazione matriciale con una matrice fissa

$$\begin{bmatrix} 02 & 03 & 01 & 01 \\ 01 & 02 & 03 & 01 \\ 01 & 01 & 02 & 03 \\ 03 & 01 & 01 & 02 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} s_{0,j} \\ s_{1,j} \\ s_{2,j} \\ s_{3,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s'_{0,j} \\ s'_{1,j} \\ s'_{2,j} \\ s'_{3,j} \end{bmatrix}$$

Nota importante:

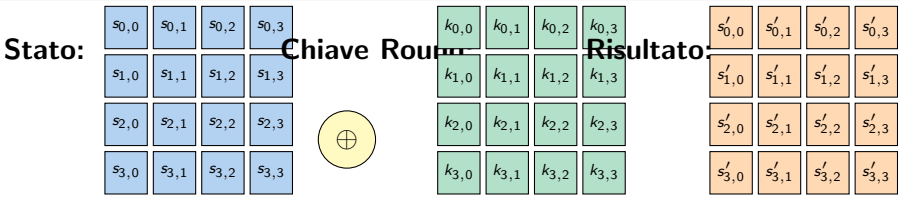
- Le operazioni sono in campo di Galois $GF(2^8)$
- Non è l'aritmetica normale! (es: $02 \times 03 \neq 6$)
- Ogni colonna viene processata indipendentemente
- **Non viene applicata** nell'ultimo round

Effetto: Massima diffusione - ogni byte di output dipende da tutti i byte di input della colonna

4. AddRoundKey - Aggiunta Chiave di Round

Obiettivo

Combinare la matrice di stato con la chiave del round corrente usando XOR bit a bit



Operazione XOR ($\oplus$):

A	B	A$\oplus$B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

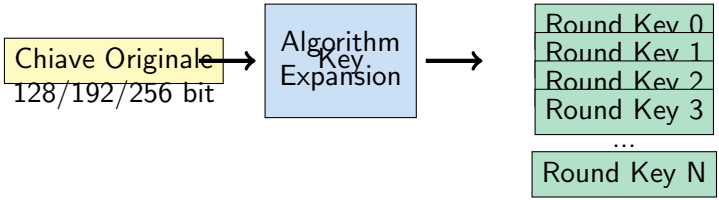
Esempio: $10110011 \oplus 11001010 = 01111001$

Key Expansion - Espansione della Chiave

Problema

AES necessita di una chiave diversa per ogni round, ma l'utente fornisce una sola chiave iniziale

Soluzione: L'algoritmo di Key Expansion genera tutte le chiavi di round dalla chiave originale



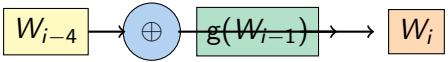
Numero di chiavi generate:

- AES-128: 11 chiavi (1 iniziale + 10 round)
- AES-192: 13 chiavi (1 iniziale + 12 round)
- AES-256: 15 chiavi (1 iniziale + 14 round)

Come Funziona la Key Expansion

Processo semplificato per AES-128:

1. La chiave di 128 bit viene divisa in 4 *word* (parole) di 32 bit ciascuna: W_0, W_1, W_2, W_3
2. Per generare le nuove word $(W_4, W_5, ..., W_{43})$:
   - **Se** la posizione è multipla di 4: applica una trasformazione speciale
     1. RotWord: ruota i byte
     2. SubWord: applica S-Box
     3. XOR con costante: Rcon
   - **Altrimenti**: semplice XOR con le word precedenti



$g()$ = RotWord + SubWord + Rcon

Proprietà importante: Ogni bit della chiave influenza tutti i round successivi (effetto valanga)

Decifratura con AES

Principio Fondamentale

La decifratura è il **processo inverso** della cifratura, applicato in ordine inverso

CIFRATURA

1. AddRoundKey
2. **Per ogni round:**
   - SubBytes
   - ShiftRows
   - MixColumns
   - AddRoundKey
3. **Round finale:**
   - SubBytes
   - ShiftRows
   - AddRoundKey

DECIFRATURA

1. AddRoundKey
2. **Per ogni round:**
   - InvShiftRows
   - InvSubBytes
   - AddRoundKey
   - InvMixColumns
3. **Round finale:**
   - InvShiftRows
   - InvSubBytes
   - AddRoundKey

Le Operazioni Inverse

InvSubBytes

- Usa la S-Box inversa
- Stessa logica ma tabella diversa
- $s = \text{S-Box}(x) \implies x = \text{InvS-Box}(s)$

InvShiftRows

- Spostamento verso destra
- Riga 0: 0 posizioni
- Riga 1: 1 posizione ($\rightarrow$)
- Riga 2: 2 posizioni ($\rightarrow$)
- Riga 3: 3 posizioni ($\rightarrow$)

InvMixColumns

- Usa una matrice inversa
- Stessa operazione matematica
- Annulla l'effetto di MixColumns

$$\begin{bmatrix} 0E & 0B & 0D & 09 \\ 09 & 0E & 0B & 0D \\ 0D & 09 & 0E & 0B \\ 0B & 0D & 09 & 0E \end{bmatrix}$$

AddRoundKey

- Identica! XOR è auto-inversa

Modi di Operazione di AES

Problema

AES cifra solo blocchi di 128 bit. Come gestiamo messaggi più lunghi?

Soluzione: I modi di operazione definiscono come applicare AES a messaggi di lunghezza arbitraria

Modi principali:

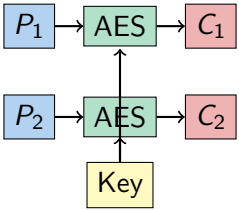
- **ECB** - Electronic Codebook
- **CBC** - Cipher Block Chaining
- **CTR** - Counter
- **GCM** - Galois/Counter Mode

Caratteristiche:

- Parallelizzazione
- Resistenza agli attacchi
- Gestione errori
- Autenticazione

ECB vs CBC

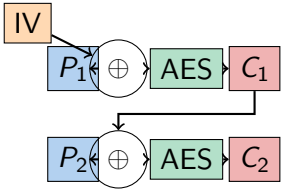
ECB - Electronic Codebook



PROBLEMA: Blocchi identici $\rightarrow$ cifrati identici

Esempio: l'immagine del pinguino Tux cifrata con ECB mostra il pattern originale

CBC - Cipher Block Chaining

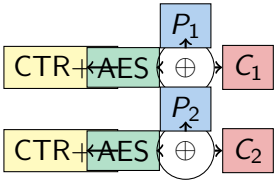


VANTAGGIO: Ogni blocco dipende dai precedenti

- Usa un IV (Initialization Vector)
- Più sicuro di ECB

CTR e GCM - Modi Moderni

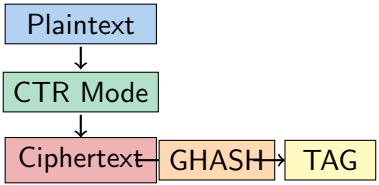
CTR - Counter Mode



Vantaggi:

- Parallelizzabile
- Accesso casuale ai blocchi
- Simmetrico (cifra=decifra)

GCM - Galois/Counter Mode



GCM = CTR + Autenticazione
Vantaggi:

- Cifratura + autenticazione
- Rileva manomissioni
- Standard per TLS 1.3
- **Molto usato oggi!**

Quanto è Sicuro AES?

Forza Brute-Force

Tentare tutte le chiavi possibili

Variante	Chiavi Possibili	Tempo Stimato*	Sicurezza
AES-128	$2^{128} \approx 3.4 \times 10^{38}$	Miliardi di anni	Alta
AES-192	$2^{192} \approx 6.3 \times 10^{57}$	Eoni	Altissima
AES-256	$2^{256} \approx 1.1 \times 10^{77}$	Oltre l'età dell'universo	Estrema

*Con computer attuali che provano 1 miliardo di chiavi/secondo

Per confronto:

- Atomi nell'universo osservabile: $\approx 10^{80}$
- AES-256 ha quasi lo stesso numero di chiavi!

Conclusione: AES è praticamente **inattaccabile** con la tecnologia attuale

Attacchi Teorici e Pratici

Attacchi Teorici

- **Biclique Attack (2011)**
  - Riduce la complessità di AES-128 a $2^{126.1}$
  - Miglioramento trascurabile
  - Non pratico
- **Related-Key Attacks**
  - Funzionano solo in scenari irrealistici
  - Richiedono chiavi correlate
  - Non applicabili in pratica

Minacce Reali

- **Implementazioni deboli**
  - Side-channel attacks
  - Timing attacks
  - Cache attacks
- **Gestione chiavi**
  - Chiavi deboli
  - Riutilizzo di IV
  - Storage non sicuro
- **Modi d'uso errati**
  - ECB per dati ripetitivi
  - Padding oracle attacks

Importante

AES è sicuro, ma deve essere **implementato e usato correttamente**!

AES e Computer Quantistici

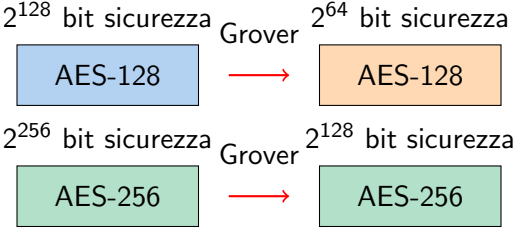
La Minaccia Quantistica

I computer quantistici potrebbero rompere molti algoritmi crittografici

Algoritmo di Grover (1996):

- Ricerca in uno spazio di N elementi
- Computer classico: $O(N)$ operazioni
- Computer quantistico: $O(\sqrt{N})$ operazioni

Impatto su AES:



Applicazioni di AES nel Mondo Reale

Comunicazioni:

- **Wi-Fi**: WPA2/WPA3
- **VPN**: OpenVPN, IPsec
- **TLS/SSL**: HTTPS
- **Messaggistica**: Signal, WhatsApp
- **SSH**: connessioni sicure

Storage:

- BitLocker (Windows)
- FileVault (macOS)
- LUKS (Linux)
- Crittografia database
- Cloud storage (Google Drive, Dropbox)

File e Archivi:

- 7-Zip (cifratura archivi)
- WinRAR
- PDF cifrati
- Office (Word, Excel)

Multimedia:

- Streaming protetto (DRM)
- Videogiochi (protezione)

Hardware:

- Processori moderni (AES-NI)
- Smartphone
- Dispositivi IoT

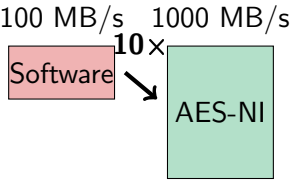
Accelerazione Hardware: AES-NI

AES-NI (AES New Instructions)

Set di istruzioni nei processori moderni per accelerare AES

Vantaggi:

- **Velocità**: 4-10× più veloce
- **Sicurezza**: resistente a side-channel
- **Efficienza**: meno consumo energetico



Disponibilità:

- Intel: dal 2010 (Westmere)
- AMD: dal 2011 (Bulldozer)
- ARM: ARMv8 Cryptography Extensions
- Smartphone moderni

Esempio Pratico in Python

Uso di AES con la libreria `cryptography`:

```
from cryptography.hazmat.primitives.ciphers import Cipher, algorithms, modes
from cryptography.hazmat.backends import default_backend
import os

# Generazione chiave casuale (256 bit)
key = os.urandom(32)  # 32 byte = 256 bit

# Generazione IV casuale (128 bit)
iv = os.urandom(16)   # 16 byte = 128 bit

# Creazione del cifrario AES in modalita CBC
cipher = Cipher(
    algorithms.AES(key),
    modes.CBC(iv),
    backend=default_backend()
)

# Cifratura
plaintext = b"Messaggio segreto per la scuola!"
# Padding necessario per blocchi di 16 byte
plaintext_padded = plaintext + b'\x00' * (16 - len(plaintext) % 16)

encryptor = cipher.encryptor()
ciphertext = encryptor.update(plaintext_padded) + encryptor.finalize()

print(f"Testo cifrato: {ciphertext.hex()}")

# Decifratura
```

Punti Chiave da Ricordare

1. **AES è lo standard mondiale** per la crittografia simmetrica
   - Sicuro, veloce, versatile
2. **Struttura basata su 4 operazioni**
   - SubBytes (confusione)
   - ShiftRows (diffusione)
   - MixColumns (diffusione)
   - AddRoundKey (combinazione con chiave)
3. **Sicurezza eccezionale**
   - Nessun attacco pratico conosciuto
   - AES-256 resistente anche ai computer quantistici
4. **Modi di operazione** essenziali per sicurezza reale
   - Evitare ECB
   - Preferire GCM per autenticazione
5. **Accelerazione hardware** rende AES velocissimo

Risorse per Approfondire

Documentazione Ufficiale:

- FIPS 197 - Specifica ufficiale AES
- NIST Special Publications

Tool Online:

- `https://www.cryptool.org/` - CrypTool (simulazioni)
- `https://aesencryption.net/` - AES Calculator
- `https://www.javainuse.com/aesgenerator` - AES Generator

Libri Consigliati:

- "Understanding Cryptography" - Paar & Pelzl
- "The Design of Rijndael" - Daemen & Rijmen

Video e Corsi:

- Coursera - Cryptography I (Stanford)
- YouTube - Computerphile (video su AES)

Quiz di Verifica

1. Qual è la dimensione del blocco in AES?
   - ☐ 64 bit
   - ☐ 128 bit
   - ☐ 256 bit
2. Quanti round ha AES-192?
   - ☐ 10
   - ☐ 12
   - ☐ 14
3. Quale operazione NON viene applicata nell'ultimo round?
   - ☐ SubBytes
   - ☐ MixColumns
   - ☐ AddRoundKey
4. Quale modo di operazione include autenticazione?
   - ☐ ECB
   - ☐ CBC
   - ☐ GCM

Risposte: 1-B, 2-B, 3-B, 4-C

Grazie per l'attenzione!

Domande?

Prof. Massimo
IIS Fermi Sacconi Ceci
Ascoli Piceno

"La crittografia è l'arte di scrivere in codice.
AES è il suo capolavoro moderno."