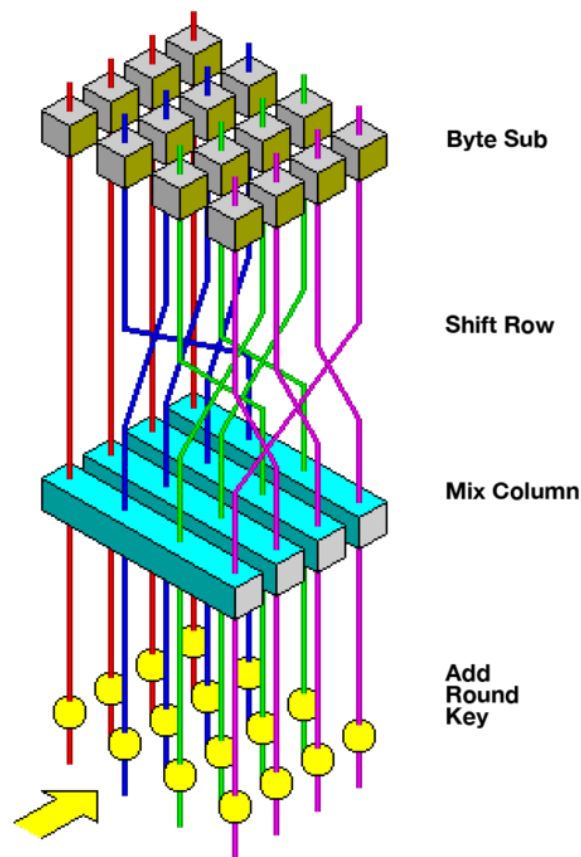


Advanced Encryption Standard

AES

Luca Rengo

v1.0.0
MAGGIO | APRILE
2022 | 2023



Indice

1	Storia di AES	3
1.1	Introduzione	3
1.2	Breve storia di AES	3
1.3	AES vs Rijndael	4
1.4	Cifratura simmetrica vs asimmetrica	5
1.5	Stream vs Block Ciphers	7
1.6	Principio di Kerchoffs	7
2	L'Algoritmo	9
2.1	Introduzione	9
2.2	I tre concetti dietro la Crittografia	9
2.3	Una panoramica sull'Algoritmo	10
	Perché lo XOR è usato in crittografia?	11
	Key Expansion Key Schedule	12
	RotWord	13
	SubWord	14
	Rcon	14
	I Rounds	14
	Add Round Key	15
	Sub Bytes	16
	Shift Rows	17
	Mix Columns	18
	Le modalità di AES	18
3	La Matematica dietro AES	21
3.1	Introduzione	21
3.2	Gruppi, Anelli e Campi	22
	Gruppo	22

	Monoide	22
	Gruppo abeliano	22
	Anello	22
	Anello commutativo	23
	Anello finito	23
	Campo	23
	Campi vs Anelli	23
	Estensione di campi	23
	Estensione algebrica	24
	Gruppo di Galois	24
	Estensione di Galois	24
3.3	Il campo di Galois	24
	Le operazioni del campo finito	25
	Addizione e sottrazione	25
	Moltiplicazione	25
	Esponenziazione	25
	Logaritmi	26
	Divisione	26
3.4	Il teorema fondamentale della teoria di Galois	26
4	Le modalità di AES	27
4.1	Introduzione	27
4.2	IV, Nonce, Salt e Pepper	27
	Nonce Number Used Once	27
	Nonce sequenziali	28
	IV Initialization Vector	28
	Salt	28
	Pepper	29
4.3	Il padding	29
4.4	A cosa servono le modalità?	30
4.5	Le modalità	31
	Modalità di cifratura senza integrità del messaggio	32
	ECB Electronic Code Book	32
	CBC Cipher Block Chain	33
	CFB Cipher Feedback	34
	OFB Output Feedback	35
	CTR Counter Mode	36
	XTS AES-XTS (XEX) Tweakable Block Cipher	36
	MACS Message Authentication Codes	37
	ALG1-6	38
	CMAC Cipher-based Message Authentication Code	39

	HMAC Keyed-hash Message Authentication Code	39
	GMAC Galois Message Authentication Code	39
	CBC-MAC	40
	AEAD Authenticated Encryption with Associated Data	40
	OCB Offset Codebook	41
	CCM Counter con CBC-MAC	41
	GCM Galois Counter Mode	41
5	L'implementazione	43
5.1	Introduzione	43
5.2	Implementazione in C++	43
	Matematica di Galois	44
	Add Round Key	46
	Sub Bytes	46
	Shift Rows	47
	Mix Columns	47
	Key Expansion	48
	Rot Word	49
	Sub Word	50
	Rcon	50
	Xor Blocks	50
	Modes	51
	ECB	51
	CBC	52
	CFB	53
	Paddings	54
	API	58
	Cifratura	58
	Decifratura	58
5.3	Implementazione in Java	59
6	Attacchi e Sicurezza su AES	65
6.1	Introduzione	65
6.2	Attacchi	65
	CCA No Chosen Ciphertext Attack	65
	Side Channel Attack	65
	Template Attack	66
	MITM Man-In-The-Middle	66
	MITM Meet-In-The-Middle	67
	Biclique Attack	67
	Related Key Attacks	67

	Known-key distinguishing Attack	67
	Social Engineering	67
	Fault Attacks	68
	Cache-Timing Attacks	68
	Key Recovery Attack Attacks on Reduced-Round AES	68
	PA Padding Attack	68
6.3	Sicurezza	68
7	Conclusioni	71
7.1	Conclusioni	71

Sommario

L'obiettivo di questo documento per un progetto universitario è quello di illustrare in breve e semplicemente il funzionamento dell'algoritmo dell'Advanced Encryption Standard (AES), fornendone innanzitutto una corta e concisa presentazione della sua storia, per poi ottenere una panoramica dall'alto del suo meccanismo, dopodiché verrà trattato la matematica dietro che regge il processo, poi verranno descritte le modalità utilizzabili possibili e i tipi di padding che possono essere incorporati nel messaggio e infine verranno indicati sommariamente gli ipotetici attacchi e la sicurezza, in generale, di AES.

Capitolo 1

Storia di AES

Introduzione

AES (*Advanced Encryption Standard*) è un cifrario a blocchi simmetrico, inventato da due matematici belghi, Vincent Rijmen e Joan Daemen, da cui viene il nome *Rijndael*, nel 1998 per sostituire il precedente standard: DES (*Data Encryption Standard*).

Breve storia di AES

DES era divenuto lo standard dopo un bando dell'NBS (*National Bureau of Standards*), oggi NIST (*National Institute for Security and Technology*) per trovare un buon e sicuro algoritmo per proteggere le comunicazioni private dei cittadini americani.

Venne così proposto un algoritmo chiamato *Lucifer*, sviluppato dall'IBM che dopo esser stato modificato dall'NSA (*National Security Agency*), riducendone la grandezza della chiave da 128 a 56 bits e rettificandone le funzioni contenute nell'S-box, venne designato come *Data Encryption Standard* (DES).

DES regnò per 20 anni, venne studiato in lungo e in largo dagli accademici e crittoanalisti di tutto il mondo, grazie a ciò, ci fu finalmente per la prima volta un cifrario certificato che tutti potevano studiare: nacque così il moderno campo della crittografia.

Negli anni, molti sfidarono DES e dopo diverse battaglie fu finalmente sconfitto.

L'unico modo per ovviare a questi attacchi era quello di combinare des tre volte, formando il 3DES (*Triplo DES*). Il problema di questo però era la sua lentezza.

Per questo, nel 1997, il NIST indisse un nuovo bando per cercare un nuovo algoritmo di cifratura, forte come il triplo-DES, ma veloce e flessibile.

AES vs DES

	DES	AES
Date	1976	1999
Block size	64	128
Key length	56	128, 192, 256
Number of rounds	16	9,11,13
Encryption primitives	Substitution, permutation	Substitution, shift, bit mixing
Cryptographic primitives	Confusion, diffusion	Confusion, diffusion
Design	Open	Open
Design rationale	Closed	Open
Selection process	Secret	Secret, but accept open public comment
Source	IBM, enhanced by NSA	Independent cryptographers

© Yingjiu Li 2007

26

Figura 1.1: AES vs DES

Vari algoritmi competerono: Serpent, Twofish, MARS, RC6, ma alla fine spuntò Rijndael per la sua semplicità e velocità.

AES vs Rijndael

AES è un'implementazione di Rijndael, divenuto l'algoritmo di cifratura standard del governo degli Stati Uniti d'America. Una differenza tra i due è che AES utilizza blocchi di dati da 128 bits, mentre Rijndael permette oltre a blocchi da 128, anche blocchi da 192 e 256 bits.

Sia AES che Rijndael permettono una grandezza della chiave di 128, 192 o 256 bits, da cui ne ricaviamo il numero di rounds: 10, 12 o 14 rispettivamente.

Cifratura simmetrica vs asimmetrica

Nella cifratura simmetrica viene usata una chiave sia per la cifratura che per la decifratura di un messaggio.

La cifratura asimmetrica è basata sul concetto di chiave pubblica e chiave privata. Vengono, quindi usate due chiavi sia per la cifratura che per la decifratura. Usiamo la chiave pubblica per cifrare il messaggio e la chiave privata per decifrarlo.

Ulteriori differenze:

Simmetrico	Asimmetrico
Richiede una sola chiave sia per la cifratura che la decifratura.	Richiede due chiavi, una pubblica e una privata, una per cifrare e una per decifrare.
Lo spazio del testo cifrato è lo stesso o più piccolo del messaggio originale.	Lo spazio del testo cifrato è lo stesso o più grande del messaggio originale.
Il processo di cifratura è molto veloce.	Il processo di cifratura è molto lento.
È usato quando un grosso ammontare di dati deve essere trasferito.	È usato per trasferire piccole quantità di dati.
Fornisce solamente la confidenzialità.	Fornisce confidenzialità, autenticità e non ripudio.
La chiave usata è di solito di lunghezza 128 o 256 bits.	La lunghezza della chiave è di 2048 o più bits.
L'utilizzo delle risorse è basso.	L'utilizzo di risorse è alto.
Esempi: DES, 3DES, AES, RC4	Esempi: DSA, RSA, Diffie-Hellman, ECC, El Gamal

Types of Encryption

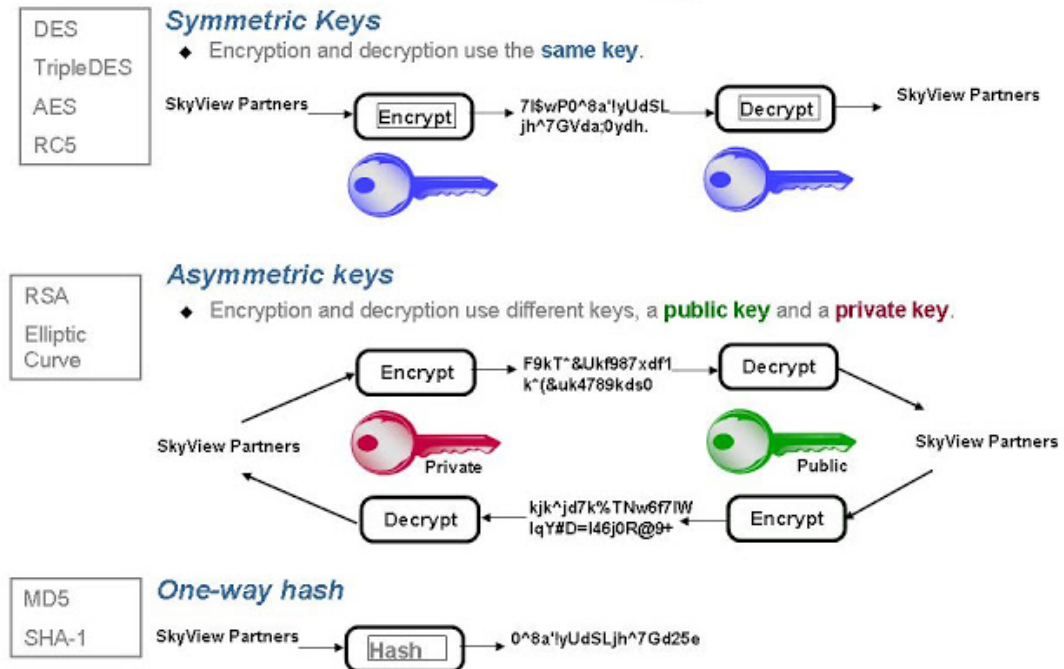


Figura 1.2: Tipi di cifratura

AES è di tipo simmetrico, quindi useremo la stessa chiave sia per cifrare il nostro messaggio sia per decifrarlo.

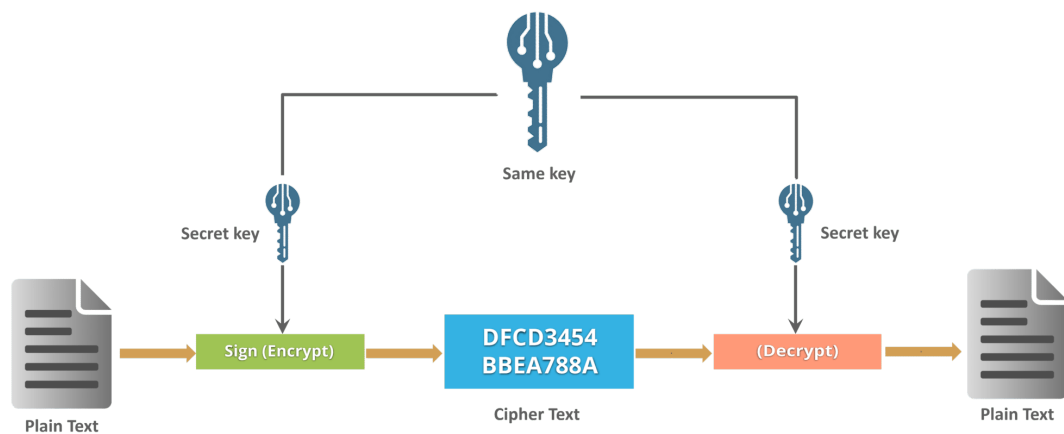


Figura 1.3: Cifratura a chiave simmetrica

Stream vs Block Ciphers

Cifrario a flusso: Il testo in chiaro viene separato in [singoli] bits che vengono poi singolarmente cifrati.

Cifrario a blocchi: Un cifrario a blocchi prende un messaggio in chiaro e lo suddivide in blocchi di bytes.

AES è un cifrario a blocchi che prende un blocco di grandezza fissa di 16 bytes (o 4 words).

Principio di Kerchoffs

L'olandese Auguste Kerckhoffs elaborò, nel 1883, due articoli riguardanti la crittografia. Nel primo enunciò sei principi, di cui il più famoso (il numero 2) sostiene che la sicurezza di un sistema crittografico non deve risiedere nella segretezza del suo algoritmo, ma soltanto nel mantenere la sua chiave segreta.

I sei principi di Kerckhoffs:

1. Il sistema deve essere praticamente, se non matematicamente, indecifrabile.
2. Non dovrebbe richiedere segretezza e non dovrebbe essere un problema se cade nelle mani nemiche.
3. Deve essere possibile comunicare e ricordare la chiave, senza utilizzare note scritte e i corrispondenti devono essere in grado di modificarla a piacimento.
4. Deve essere applicabile a comunicazioni attraverso il telegrafo.
5. Deve essere portatile, e non dovrebbe richiedere diverse persone per poterlo utilizzare.
6. Il sistema dovrebbe essere facile da usare e non dovrebbe essere stressante o richiedere ai propri operatori di seguire una lunga lista di procedure.

Capitolo 2

L'Algoritmo

Introduzione

In questo capitolo, tratteremo il funzionamento dell'algoritmo di AES con una panoramica dall'alto, per poi affrontare nel prossimo capitolo, più in dettaglio, la sua matematica.

I tre concetti dietro la Crittografia

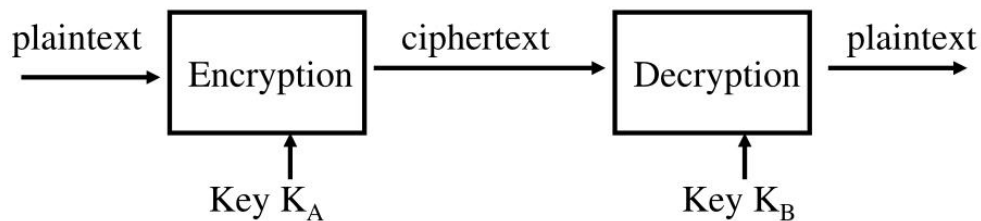
Alla base della crittografia, ci sono due importanti proprietà dei cifrari a chiave simmetrica, elaborati dal padre della teoria dell'informazione, Claude Elwood Shannon, ovvero: *diffusione* e *confusione*.

Il principio della *confusione* vela la connessione tra il messaggio originale e il testo cifrato.

La proprietà di *diffusione*, invece, riguarda lo scombusolamento della posizione dei caratteri del messaggio.

Un altro importante concetto è quello della *segretezza della chiave*, ovvero che l'algoritmo alla base del cifrario è conosciuto, è pubblico, ma la sola conoscenza di questo non è sufficiente per poter conseguire l'accesso alle informazioni, perché per poter attingerle sarà necessario conoscere la chiave segreta.

Confusion and Diffusion



- Terms courtesy of Claude Shannon, father of Information Theory
- "Confusion" = Substitution
 - $a \rightarrow b$
 - Caesar cipher
- "Diffusion" = Transposition or Permutation
 - $abcd \rightarrow dacb$
 - DES

Figura 2.1: Confusione e Diffusione

Una panoramica sull'Algoritmo

I dati di input vengono caricati in una matrice 4x4, anche chiamata *state matrix* (matrice di stato), dove ogni cella rappresenta 1 byte di informazione e su queste compiamo diverse operazioni: *sub bytes* (sostituzione dei bytes), *shift rows* (spostamento delle righe), *mix columns* (mescolamento delle colonne), *add round key* (aggiunta della chiave del round) per un numero di volte, di rounds pari alla grandezza della chiave.

	Key Length (<i>Nk words</i>)	Block Size (<i>Nb words</i>)	Number of Rounds (<i>Nr</i>)
AES-128	4	4	10
AES-192	6	4	12
AES-256	8	4	14

Key-Block-Round Combinations

Figura 2.2: Key Size e Numero di Rounds

Nel primo round svolgiamo uno XOR tra il messaggio d'input e la chiave segreta.

Lo XOR (*EX*clusive-*OR*) bit-a-bit è un'operazione di maccheratura dei bit, dove se i due bit di input sono diversi, allora produrrà un 1 in uscita, altrimenti se sono uguali, uno zero.

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Figura 2.3: Tabella della verità dello XOR

Perché lo XOR è usato in crittografia?

- Lo XOR non *leaka* informazioni sull'input originale.
- Lo XOR è una *involutory function* (funzione involutoria) tale che se la applichi due volte riottiieni il testo originale.
- L'output dello XOR dipende da entrambi gli input. Non è così per le altre operazioni (AND, OR, NOT, ecc.).



Key Expansion | Key Schedule

Per poter elaborare i rounds, l'algoritmo ha bisogno di molte chiavi, una per round, queste vengono tutte derivate dalla chiave iniziale.

Il procedimento per ricavarle è questo:

1. Sposta la prima cella dell'ultima colonna della precedente chiave in fondo alla colonna.
2. Ogni byte viene posto in una substitution box che lo mapperà in qualcos'altro.
3. Viene effettuato uno XOR tra la colonna e una *round constant* (costante di round) che è diversa per ogni round.
4. Infine viene realizzato uno XOR con la prima colonna della precedente chiave.

Per le altre colonne, vengono semplicemente eseguiti degli XOR con la stessa colonna della precedente chiave (eccetto per le chiavi a 256 bit che hanno un procedimento un po' più complicato).

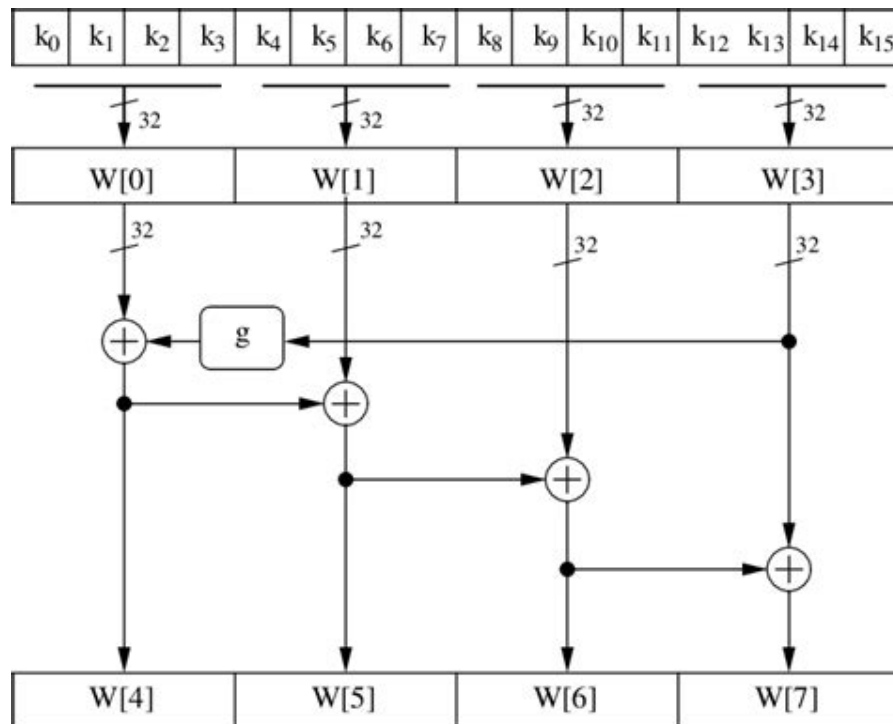


Figura 2.4: Key Expansion

La singola chiave viene espansa in 11 chiavi per AES-128, 13 per AES-192 e 15 per AES-256.

Ogni byte della chiave viene inserita in vari arrays, in cui verranno eseguite delle specifiche operazioni: *RotWord*, *SubWord*, *Rcon* e infine verranno eseguiti degli XOR tra loro.

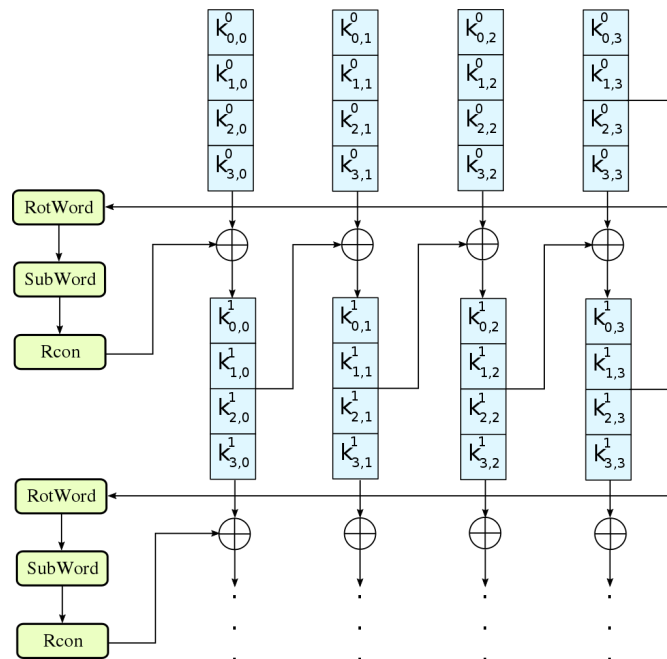


Figura 2.5: Key Expansion

RotWord

Questa funzione ruota una word di 32 bits.

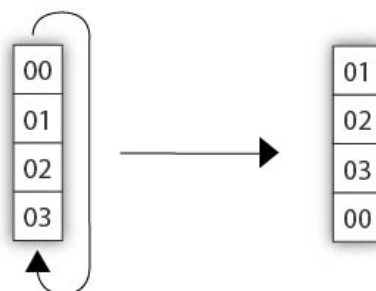


Figura 2.6: Rot Word

SubWord

La funzione *SubWord* sostituisce una word di 32 bits con l'S-BOX.

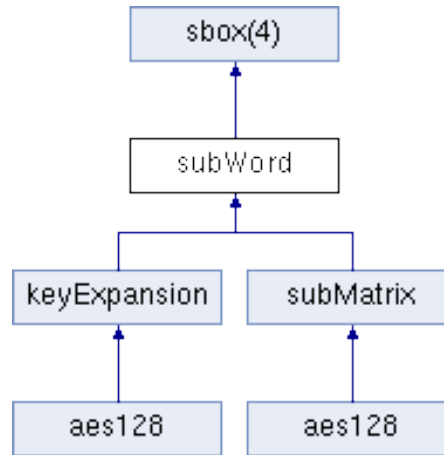


Figura 2.7: Sub Word

Rcon

Questa funzione ricorsiva permette di generare delle costanti di round, attraverso questa formula:

- il $\text{round_constant}(1) = 1$.
- $\text{round_constant}(i) = 2 \cdot \text{round_constant}(i - 1)$ se $\text{round_constant}(i - 1) < 0x80$
- $\text{round_constant}(2 \cdot \text{round_constant}(i - 1)) \oplus 0x11B \geq 0x80$

I Rounds

Dopo aver ottenuto le chiavi, vengono compiuti i vari rounds.

Per ogni round, eseguiamo questi passaggi, tranne per l'ultimo dove non effettuiamo il passaggio delle *Mix Columns*, perché non aumenterebbe la sicurezza e semplicemente rallenterebbe:

Applichiamo il principio di *confusione* attraverso il passaggio *Sub-bytes*.

- Sub-bytes: Ogni byte viene mappato in un diverso byte attraverso una s-box. Questo step applica la proprietà di *confusione* di Shannon, perché oscura la relazione tra ogni byte.

Applichiamo la proprietà di *diffusione*:

- Shift Rows: La seconda riga della matrice viene spostata di 1 verso sinistra. La terza riga di 2 posizioni e la quarta di 3 (sempre verso sinistra).
- Mix Columns: Ogni bit delle colonne della matrice (di stato) vengono mischiate.

Applichiamo la proprietà di *segretezza della chiave*:

- Add Round Key: Viene applicata la chiave del prossimo round attraverso uno XOR.

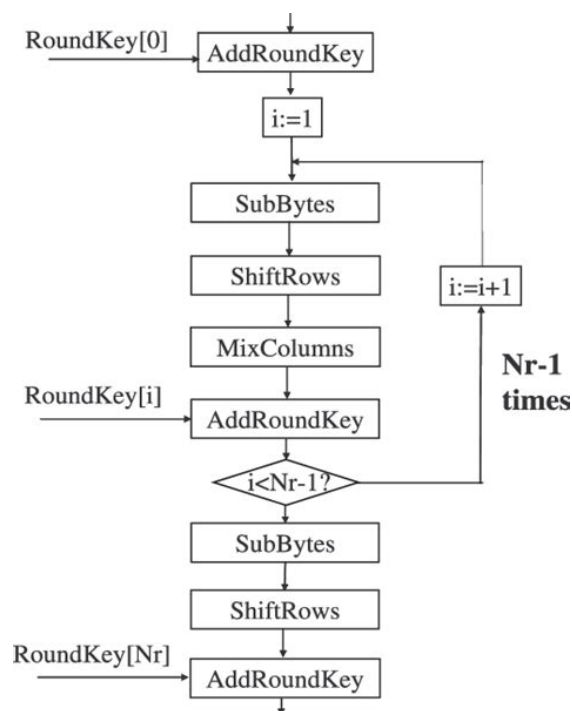


Figura 2.8: AES Rounds Flowchart

Più rounds aggiungiamo, più sicurezza, ma questo porterebbe ad un rallentamento dell'algoritmo e quindi delle performance. Per questo serve un compromesso tra sicurezza e prestazioni.

Quando AES era in sviluppo venne trovata una scorciatoia attraverso 6 rounds, per evitare ciò, sono stati aggiunti 4 rounds extra, come *margin di sicurezza*.

Add Round Key

Viene aggiunto (ovvero nella matematica di Galois viene eseguito un'operazione di XOR) tra la matrice di stato (16 bytes = 4 words) e la chiave di round (anch'essa 16 bytes).

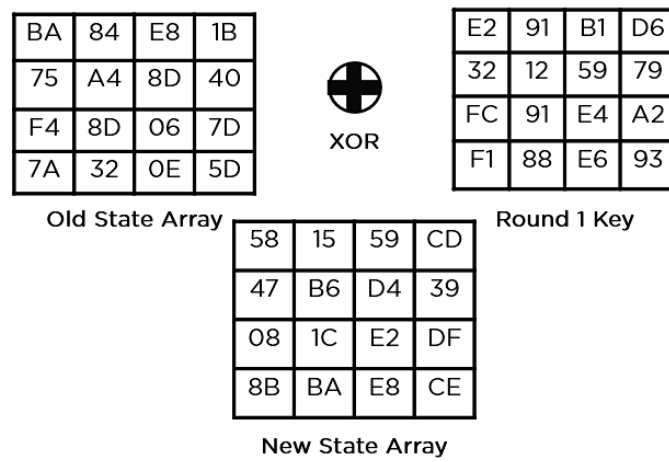


Figura 2.9: Add Round Key

Per esempio, nell'immagine sopra, $BA \oplus E2 = 58 \Leftrightarrow 10111010 \oplus 11100010 = 10111000$.

Sub Bytes

Ognuno dei 16 bytes della matrice di stato viene sostituito con il corrispondente byte della S-BOX.

AES S-Box

		right (low-order) nibble															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	a	b	c	d	e	f
left (high-order) nibble	0	63	7c	77	7b	f2	6b	6f	c5	30	01	67	2b	fe	d7	ab	76
	1	ca	82	c9	7d	fa	59	47	f0	ad	d4	a2	af	9c	a4	72	c0
	2	b7	fd	93	26	36	3f	f7	cc	34	a5	e5	f1	71	d8	31	15
	3	04	c7	23	c3	18	96	05	9a	07	12	80	e2	eb	27	b2	75
	4	09	83	2c	1a	1b	6e	5a	a0	52	3b	d6	b3	29	e3	2f	84
	5	53	d1	00	ed	20	fc	b1	5b	6a	cb	be	39	4a	4c	58	cf
	6	d0	ef	aa	fb	43	4d	33	85	45	f9	02	7f	50	3c	9f	a8
	7	51	a3	40	8f	92	9d	38	f5	bc	b6	da	21	10	ff	f3	d2
	8	cd	0c	13	ec	5f	97	44	17	c4	a7	7e	3d	64	5d	19	73
	9	60	81	4f	dc	22	2a	90	88	46	ee	b8	14	de	5e	0b	db
	a	e0	32	3a	0a	49	06	24	5c	c2	d3	ac	62	91	95	e4	79
	b	e7	c8	37	6d	8d	d5	4e	a9	6c	56	f4	ea	65	7a	ae	08
	c	ba	78	25	2e	1c	a6	b4	c6	e8	dd	74	1f	4b	bd	8b	8a
	d	70	3e	b5	66	48	03	f6	0e	61	35	57	b9	86	c1	1d	9e
	e	e1	f8	98	11	69	d9	8e	94	9b	1e	87	e9	ce	55	28	df
	f	8c	a1	89	0d	bf	e6	42	68	41	99	2d	0f	b0	54	bb	16

S-Box

- Hex: 95 → 2A

Figura 2.10: S-BOX

Come si evince dall'esempio nell'immagine il valore 95, prendendo la nona riga e la quinta colonna, viene sostituito con il valore 2A.

Shift Rows

Rotazione della seconda, terza e quarta riga.

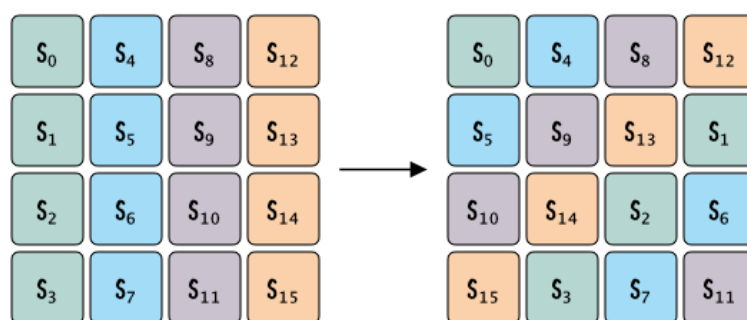


Figura 2.11: Shift Rows

- Shift della seconda riga di 1 posizione a sinistra.

- Shift della terza riga di 2 posizioni a sinistra.
- Shift della quarta riga di 3 posizioni a sinistra.

Mix Columns

Ogni byte viene della matrice dello stato è combinato usando una trasformazione lineare invertibile.

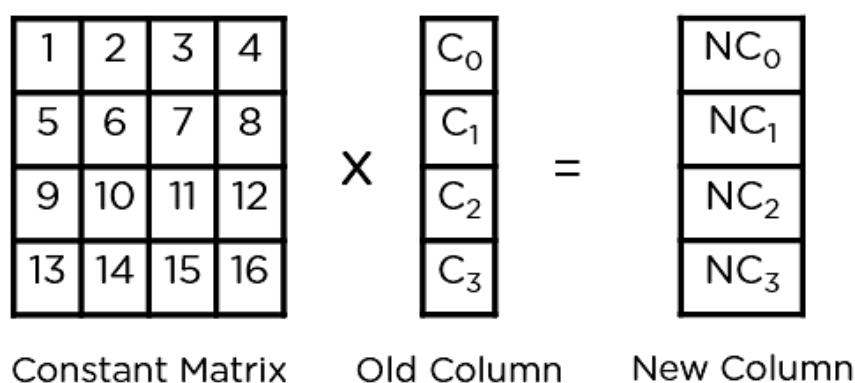


Figura 2.12: Mix Columns

Le equazioni per ricavare la nuova colonna:

$$NC_0 = \text{galois_multiplication1}(C_0) \oplus \text{galois_multiplication2}(C_1) \oplus C_2 \oplus C_3$$

$$NC_1 = C_0 \oplus \text{galois_multiplication1}(C_1) \oplus \text{galois_multiplication2}(C_2) \oplus C_3$$

$$NC_2 = C_0 \oplus C_1 \oplus \text{galois_multiplication1}(C_2) \oplus \text{galois_multiplication2}(C_3)$$

$$NC_3 = \text{galois_multiplication2}(C_0) \oplus C_1 \oplus C_2 \oplus \text{galois_multiplication1}(C_3)$$

Le modalità di AES

AES non può essere utilizzato così com'è, ma necessita di essere adoperato in combinazione a una modalità. Una modalità è un sistema per trasformare l'efficacia di un algoritmo crittografico.

Di seguito, alcune delle modalità di AES:

- **ECB** (*Electronic Code Book*)
- **CBC** (*Cipher Block Chaining*)
- **CFB** (*Cipher FeedBack*)

- OFB (*Output FeedBack*)
- CTR (*Counter mode*)

Capitolo 3

La Matematica dietro AES

Introduzione

In questo capitolo tratteremo più a fondo la matematica che sta dietro questo algoritmo. Per poterlo fare avremo bisogno di introdurre alcune strutture matematiche come: i gruppi, gli anelli e i campi, dopodiché ci soffermeremo su uno specifico campo, quello di Galois, ne mostreremo le operazioni possibili e come ne usufruiremo nei passi trattati nel capitolo degli algoritmi.

Gruppi, Anelli e Campi

Prima di introdurre il campo di Galois, facciamo chiarezza tra i Gruppi, gli Anelli e i Campi.

Gruppo

Un gruppo è una struttura algebrica composta da un'insieme vuoto \emptyset e un'operazione binaria $(+ \text{ e } \cdot)$ per l'elemento neutro e per l'elemento inverso.

Il gruppo deve soddisfare tre assiomi:

- I. proprietà associativa: dati a, b, c ; $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$
- II. esistenza dell'elemento neutro: elemento neutro e tale che $a \cdot e = e \cdot a = a$
- III. esistenza dell'inverso: esiste a' , detto inverso, tale che $a \cdot a' = a' \cdot a = e$

Monoide

Il monoide è una struttura algebrica fornita dell'operazione binaria associativa e di un elemento neutro.

Gruppo abeliano

È un gruppo che gode della proprietà commutativa.

Anello

Un anello è una struttura algebrica, dove sono definite due operazioni: $+$ e \cdot (somma e prodotto) che rispetta le proprietà: commutativa, distributiva (della moltiplicazione rispetto all'addizione) e dove esiste un elemento neutro nell'addizione ($a + 0 = 0 + a = a$) e nella moltiplicazione ($a \cdot 1 = 1 \cdot a = a$).

Quindi, un anello è:

- due operazioni binarie $+$ e \cdot che rispettano i 3 assiomi degli anelli:
 - gruppo abeliano rispetto all'addizione (proprietà commutativa).
 - monoide rispetto alla moltiplicazione (proprietà associativa ed elemento neutro)
 - moltiplicazione distributiva rispetto all'addizione.

Anello commutativo

È un tipo di anello in cui l'operazione moltiplicativa gode della proprietà commutativa.

Anello finito

Un anello finito è un anello che possiede un numero finito di elementi.

Campo

Un campo \mathbb{K} è una struttura algebrica formata da un insieme non vuoto e due operazioni binarie $+$ e \cdot in cui:

- l'insieme e l'operazione $+$ sono un gruppo abeliano con elemento neutro.
- $\mathbb{K} \setminus \{0\}$ e l'operazione \cdot sono un gruppo abeliano con elemento neutro 1.
- la moltiplicazione è distributiva rispetto all'addizione.

Un campo può essere definito anche come un anello commutativo dove ogni elemento non nullo possiede un inverso. O anche come un corpo commutativo alla moltiplicazione.

Campi vs Anelli

La differenza fra queste due strutture è questa, ovvero:

Un anello è un gruppo abeliano rispetto alla prima operazione ($+$ addizione), ma non rispetto alla seconda, mentre, il campo è un gruppo abeliano rispetto a entrambe le operazioni.

Di seguito, alcuni esempi:

Esempio: L'anello dei numeri interi $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ è un gruppo abeliano rispetto all'addizione: $5 + (-5) = 0$. Ma non è un gruppo abeliano rispetto alla moltiplicazione, perché non esiste un inverso di un numero intero n tale che $n \cdot n^{-1} = 1$, $5 \cdot \frac{1}{5} \notin \mathbb{Z} = 1$

Esempio: Anello numeri frazionari è un campo: $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$ è un gruppo abeliano rispetto all'addizione e alla moltiplicazione: $5 + (-5) = 0$. $5 \cdot \frac{1}{5} = 1$

Estensione di campi

Essa è uno studio di coppie di campi, l'uno contenuto nell'altro. Una tale coppia prende il nome di **estensione di campi**.

Se L è un campo e K è un campo contenuto in L tale che le operazioni di campo in K sono le stesse di quelle in L , diciamo che K è un sottocampo di L , che L è un'estensione di K e che L/K è un'estensione di campi.

Fonte: Wikipedia [1]

Estensione algebrica

L'estensione algebrica, in algebra astratta, una estensione di campi L/K è detta algebrica se ogni elemento L è ottenibile come radice di un qualche polinomio a coefficienti in K .

Sia K un campo, una estensione è il dato di un altro campo L e di un omomorfismo iniettivo di K in L . Tramite l'omomorfismo K può essere visto come un sottocampo di L . L'estensione è generalmente indicata con la notazione L/K .

Fonte: Wikipedia [2]

Gruppo di Galois

Il gruppo di Galois è un gruppo associato a un'estensione di campi, in particolare i gruppi associati a estensioni che sono di Galois.

Fonte: Wikipedia [3]

Estensione di Galois

È un'estensione algebrica E/F che soddisfa le condizioni descritte qui sotto. Il senso è che un'estensione di Galois ha un gruppo di Galois e obbedisce al teorema fondamentale della teoria di Galois.

Fonte: Wikipedia [4]

Il campo di Galois

Il campo finito o anche denominato il campo di Galois, dal matematico francese Évariste Galois, è un campo che contiene un numero finito di elementi che ci permette di attuare operazioni su numeri a 8 bits.

Fornisce una connessione tra teoria di campi e teoria dei gruppi, attraverso il teorema fondamentale della teoria di Galois.

Lo introdusse per studiare le radici dei polinomi e risolvere queste equazioni polinomiali in termini di gruppi di permutazione delle loro radici.

Un'equazione è risolvibile dai suoi radicali se le sue radici si possono esprimere da una formula che riguarda numeri interi, radici ennesime e le 4 operazioni aritmetiche basilari (+, -, ·, /).

Questo generalizza il teorema di Abel-Ruffini che afferma che non ci sono soluzioni in radicali alle equazioni polinomiali di grado 5 o superiori con coefficienti arbitrari.

Ora arriviamo al motivo per cui ci interessa:

Il più comune campo di Galois è il campo $GF(256)$ o anche designato $GF(2^8)$ (GF = Galois Field) che ci permette di definire operazioni sono a livello di byte, dove i bits vengono interpretati come coefficienti dei polinomi del campo finito.

Le operazioni del campo finito

Nel campo finito sono disponibili le quattro operazioni basilari dell'aritmetica, $(+, -, \cdot, /)$ e di conseguenza l'esponenziazione e i logaritmi.

I numeri vengono rappresentati come polinomi di 8 bits, ovvero, per esempio il numero esadecimale 0x53, ovvero 83 in decimale o 01010011 in binario può essere rappresentato come $x^6 + x^4 + x + 1$ perché 01010011 ($1 \cdot 2^6, 1 \cdot 2^4, 1 \cdot 2^1, 1 \cdot 2^0 \Leftrightarrow x^6 + x^4 + x + 1$).

Addizione e sottrazione

Somma e sottrazione vengono eseguite tramite uno XOR.

Per esempio: prendiamo due polinomi: $x + 1$ e $x^2 + 1$. $x + 1$ equivale a $2^1 + 2^0$, ovvero in binario il numero 11. $x^2 + 1$ equivale a $1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$, ovvero in binario al numero 101. dopodiché eseguiamo, semplicemente, uno XOR tra i due polinomi. $011 \oplus 101$ oppure $x + 1 \oplus x^2 + 1 = 110$ o $x^2 + x$

Moltiplicazione

Per la moltiplicazione è un pochino più complicato.

Avvenuta l'operazione, è necessario compiere un'operazione di modulo con il polinomio $x^8 + x^4 + x^3 + x + 1$.

per esempio $0x53 \cdot 0xCA = 0x01$, perché:

$$0x53 = 83 = 1010011 = x^6 + x^4 + x + 1$$

$$0xCA = 202 = 11001010 = x^7 + x^6 + x^3 + x$$

$$\begin{aligned} & (x^6 + x^4 + x + 1)(x^7 + x^6 + x^3 + x) \\ &= (x^{13} + x^{12} + x^9 + x^7) + (x^{11} + x^{10} + x^7 + x^5) + (x^8 + x^7 + x^4 + x^2) + (x^7 + x^6 + x^3 + x) \\ &= x^{13} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^9 + x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x \\ & x^{13} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^9 + x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x \text{ modulo } x^8 + x^4 + x^3 + x + 1 = 1. \end{aligned}$$

Esponenziazione

L'esponenziazione è semplicemente la ripetizione della moltiplicazione.

Alcuni numeri possiedono la proprietà di attraversare tutti i 255 numeri non-zero del campo quando vengono moltiplicati per se stessi. Questi numeri vengono chiamati *generatori*.

Possiamo raccogliere questi numeri in una tabella, la tabella dei generatori.

Logaritmi

Per eseguire i logaritmi possiamo avvalerci della tabella dei generatori.

Divisione

Si fa prendendo i logaritmi dei due numeri e eseguendo il modulo 255.

$g^{(x-y) \bmod 255}$ dove g è uno dei generatori.

Il teorema fondamentale della teoria di Galois

È un teorema che crea un legame tra gli intercampi di un'estensione di Galois e i sottogruppi del relativo gruppo di Galois.

Data un'estensione di campi M/K con gruppo di Galois $G = \text{Gal}(M/K)$ definiamo i e j (due funzioni):

- Per ogni intercampo L (cioè tale che $K \subseteq L \subseteq M$) poniamo $i(L) = \text{Gal}(M/L)$, ossia il sottogruppo degli automorfismi di M che lasciano fissi gli elementi di L .
- Per ogni sottogruppo H di G , $j(H)$ che classicamente è indicato con M^H , è l'intercampo costituito dagli elementi di M lasciati fissi da tutti gli automorfismi di H .

Fonte: Wikipedia [5]

Capitolo 4

Le modalità di AES

Introduzione

In questa parte tratteremo le varie modalità di crittografia disponibili per AES. Queste ci permetteranno di cifrare messaggi di varia lunghezza.

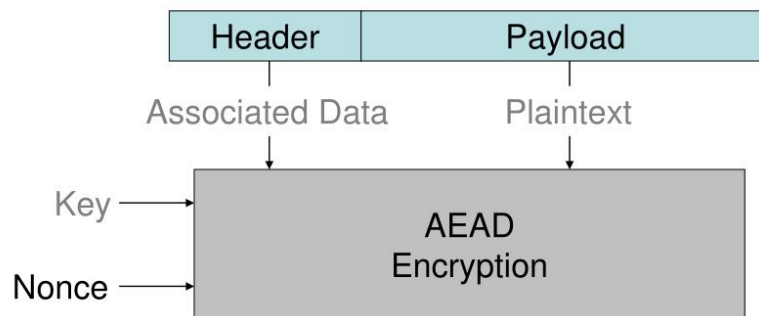
IV, Nonce, Salt e Pepper

Prima di poter trattare le modalità è necessario introdurre alcuni componenti che ci serviranno nell'utilizzo di queste. Questi sono l'IV, il nonce, il sale e il pepe.

Nonce | Number Used Once

Il nonce, *number used once* (numero utilizzato una volta), sono dei bits (ovvero un numero) che vengono utilizzati una singola volta. Il riutilizzo non è proibito, ma deve essere limitato.

Nonce



Each encryption operation **MUST** have a distinct nonce

Figura 4.1: Nonce

Viene utilizzato nei protocolli di autenticazione per garantire la sicurezza nelle comunicazioni (private) (ed evitare replay attacks).

Nonce sequenziali

Garantiscono la non ripetizione, se molto grandi.

IV | Initialization Vector

L'initialization vector o anche definito starting variables è un input di dimensione fissa, ovvero un numero arbitrario che viene adoperato per impostare lo stato iniziale di un algoritmo crittografico. Viene utilizzato in varie modalità di cifratura per *randomizzare* la cifratura in modo da produrre diversi testi cifrati anche se lo stesso testo viene cifrato molteplici volte.

Salt

Il sale viene utilizzato nelle password per incrementarne la sicurezza. Vengono aggiunti dei caratteri unici casuali alla password, in questo modo un attaccante non necessita solamente di un dizionario di password comuni, ma anche di uno per ogni tipo di sale possibile.



Figura 4.2: Salt

Questa tecnica è molto importante e viene utilizzata nei database affinché le password degli utenti siano sicure. (e non possano essere rubate).

Le password non vengono mai, possibilmente, memorizzate nei database in chiaro, ma gli viene aggiunto il salt e poi viene eseguito l'hashing su esse.

Pepper

Il pepper è simile al salt, ma questo a differenza del sale che è meramente unico più che segreto, è un (singolo) carattere segreto aggiunto alla fine della password.

Questo, (a differenza del sale) non viene memorizzato nello stesso database assieme alla password hash e al sale, ma a parte.

Il padding

Un altro elemento utilizzato nei cifrari a blocchi è il padding. Il padding serve per riempire i blocchi del cifrario con dei bytes.

È un modo per cifrare messaggi anche di grandezze che il cifrario non sarebbe in grado di decifrare. Non aumenta la sicurezza, anzi se mal implementato può portare ad attacchi di padding (*padding oracle attack*).

Grazie a questa tecnica, è possibile aggiungere, all'inizio, al centro o in fondo al messaggio, del nonsense per oscurare parti del messaggio che altrimenti sarebbero prevedibili, come: *Caro...*, *Gentile...*, *Cordiali Saluti...*, ecc.

I principali meccanismi di padding sono:

- **No padding:** Nessun padding viene aggiunto al messaggio.

- **0-Padding:** Vengono aggiunti dei bytes con degli zeri alla fine dell'ultimo blocco, finché non abbiamo il corretto numero di bytes (in AES è 16 bytes); se già abbiamo il numero necessario di bytes, allora non viene aggiunto nulla
- **1-0-Padding:** Viene aggiunto un byte a 1 e il restante viene riempito da bytes di 0 finché non abbiamo il numero necessario di bytes; se il numero di bytes necessario è già presente, allora aggiungiamo un altro blocco.
- **ANSI X9.23 Padding:** Aggiungiamo bytes di 0 alla fine dell'ultimo blocco, finché non abbiamo 16 - 1 bytes. Nell'ultimo blocco inseriamo il numero totale di bytes a 0 che abbiamo aggiunto; se l'ultimo blocco è già pieno (corrisponde a 16 bytes), allora aggiungiamo blocco addizionale.
- **ISO 10126 Padding:** Vengono aggiunti dei bytes casuali in fondo all'ultimo blocco, finché non abbiamo 16 - 1 bytes e nell'ultimo byte inseriamo il numero totale di bytes casuali che abbiamo immesso; Se l'ultimo blocco è già 16 bytes, allora aggiungiamo un altro blocco.
- **PKCS#7:** Aggiungiamo il numero totale di bytes che restano per riempire il blocco in ogni byte rimanente, finché non abbiamo 16 bytes.

A cosa servono le modalità?

Le modalità servono, perché AES è un cifrario a blocchi di 16 bytes, dopo aver preso un blocco e una chiave in input restituisce un altro blocco della medesima grandezza.

Quindi, se si desidera cifrare una sequenza di bytes di lunghezza maggiore di 16, è necessario utilizzare una *modalità di operazione* o *modalità di cifratura*.

Queste modalità sono indipendenti dal tipo di cifrario che sta alla base.

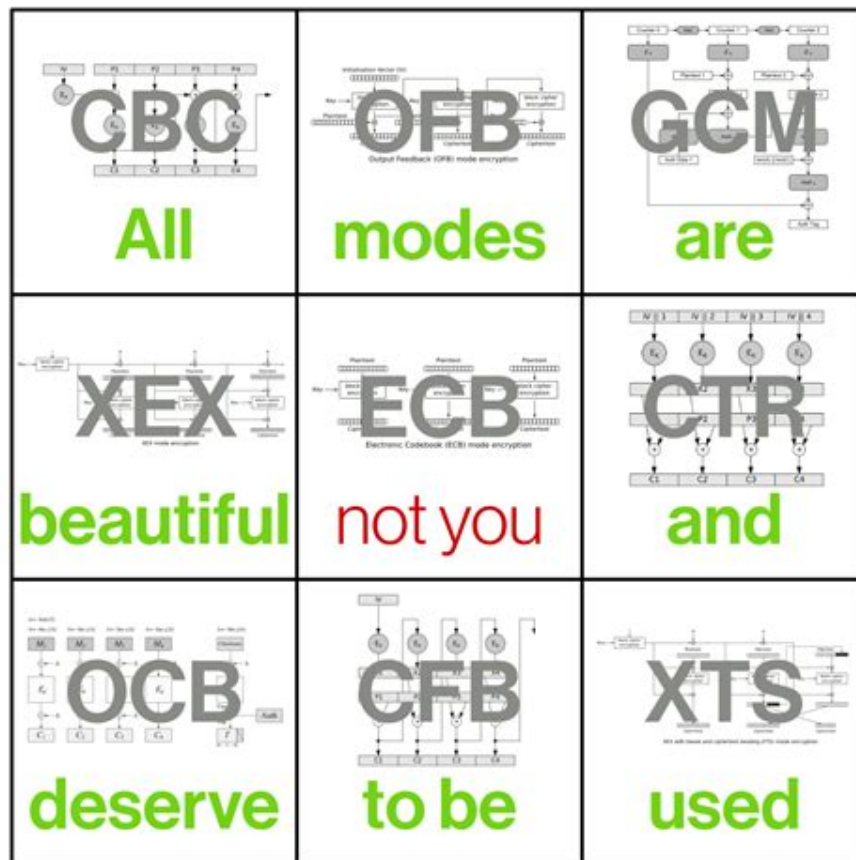


Figura 4.3: Modalità di AES

Le modalità

Qui, di seguito elencherò le caratteristiche e proprietà delle principali modalità di cifratura:

Modalità di cifratura senza integrità del messaggio

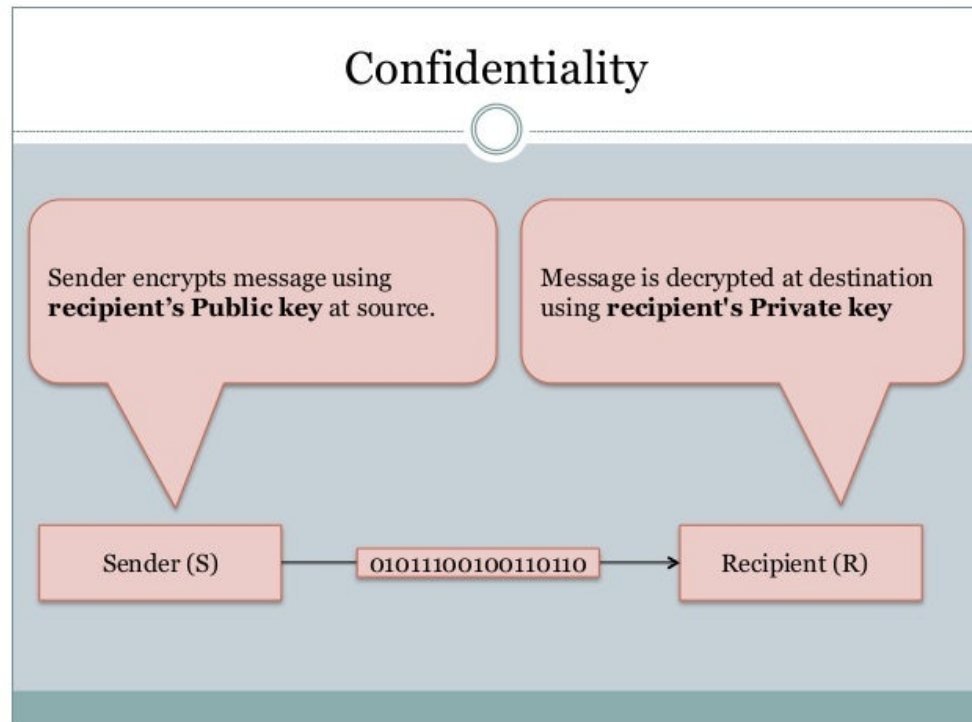


Figura 4.4: Confidenzialità

Queste modalità forniscono la cifratura del messaggio, ma non garantiscono l'integrità del messaggio, ovvero non è assicurato che il messaggio non sia stato manomesso e quindi non è possibile accertare l'autenticazione del messaggio originale.

ECB | Electronic Code Book

Questa modalità di cifratura divide il nostro messaggio in diversi blocchi e ognuno di questi viene cifrato separatamente.

Questa modalità manca il principio di diffusione e quindi cifra lo stesso messaggio in chiaro nello stesso testo cifrato, quindi non vela il pattern dei dati.

In generale, ECB è considerata una modalità obsoleta, da non utilizzare. È una modalità molto debole e poco sicura.

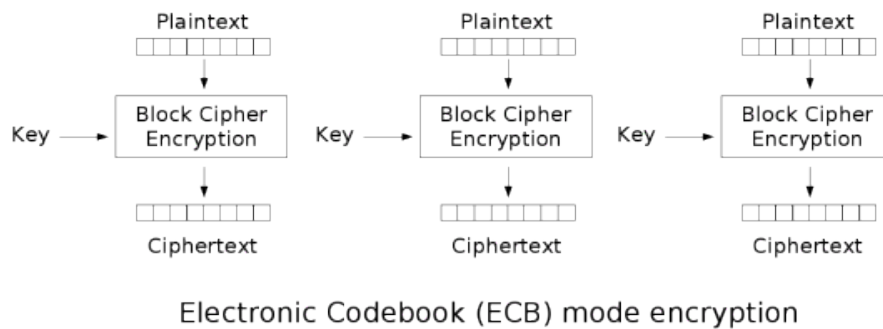


Figura 4.5: ECB

Come si deduce dall'immagine, ogni blocco viene cifrato indipendentemente. Viene inserito il messaggio in chiaro e la chiave all'interno del cifrario per ottenere il testo cifrato. Blocchi di testo in chiaro uguali vengono cifrati allo stesso modo.

Per questo, osservando il testo cifrato è possibile riconoscere, se presenti nel testo in chiaro, parti cifrate allo stesso modo.

Per decifrare, eseguiamo l'operazione inversa, immettendo un blocco cifrato assieme alla chiave, per ottenere il testo decifrato.

Ricapitolando i problemi di ECB:

- ECB è deprecato e non dovrebbe essere utilizzato.
- Gli stessi blocchi di messaggio vengono cifrati con gli stessi blocchi cifrati.

CBC | Cipher Block Chain

La modalità CBC cerca di ovviare ai problemi dell'ECB aggiungendo della casualità a ogni operazione di cifratura usufruendo di un initialization vector (IV) per il primo blocco e dopodiché applicando uno XOR a ogni blocco di testo in chiaro con il blocco cifrato precedente.

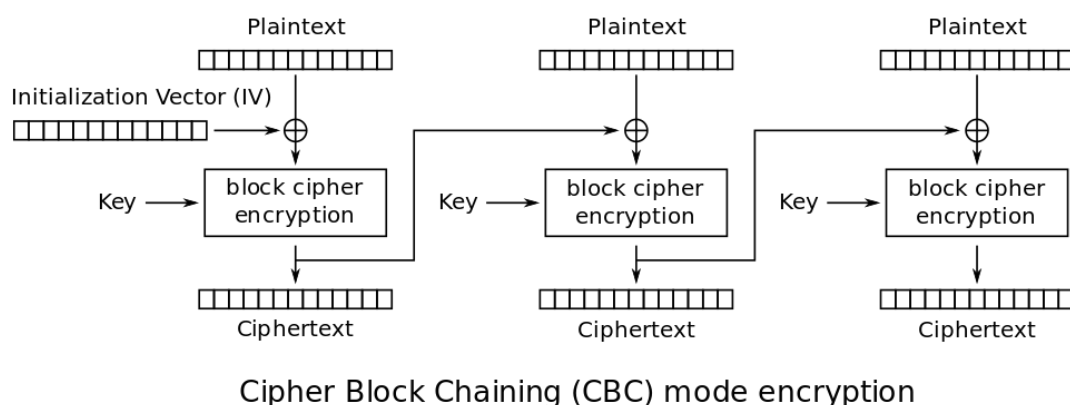


Figura 4.6: CBC

Ricapitolando le fasi che si evincono dallo schema, qui sopra:

- Collega ("Incatena" da *Chaining*) tutti i blocchi.
- L'IV (*Initialization Vector*) è usato per modificare il testo in chiaro.
- Viene eseguito lo XOR tra il blocco cifrato precedente e il blocco col testo in chiaro corrente.
- Risolve il problema dei blocchi di testo in chiaro uguali vengano cifrati allo stesso modo. (problema presente in ECB)
- Modificando un bit di un blocco di testo in chiaro, modifica di conseguenza tutti gli altri blocchi cifrati a seguire.

Sono possibili degli attacchi su CBC, se l'attaccante modifica ogni secondo blocco in chiaro se è a conoscenza dell'intero testo in chiaro.

Questa modalità è sicura come uno schema probabilistico e la confidenzialità non viene raggiunta se l'IV è un nonce semplice.

CFB | Cipher Feedback

CFB è molto simile a CBC, ma al posto di essere un cifrario a blocchi, è un cifrario a stream, *stream cipher*, ovvero un cifrario che prende una chiave e un algoritmo e lo applica allo stream (un bit alla volta), a ogni singolo bit (bit a bit) e non a blocchi di bits.

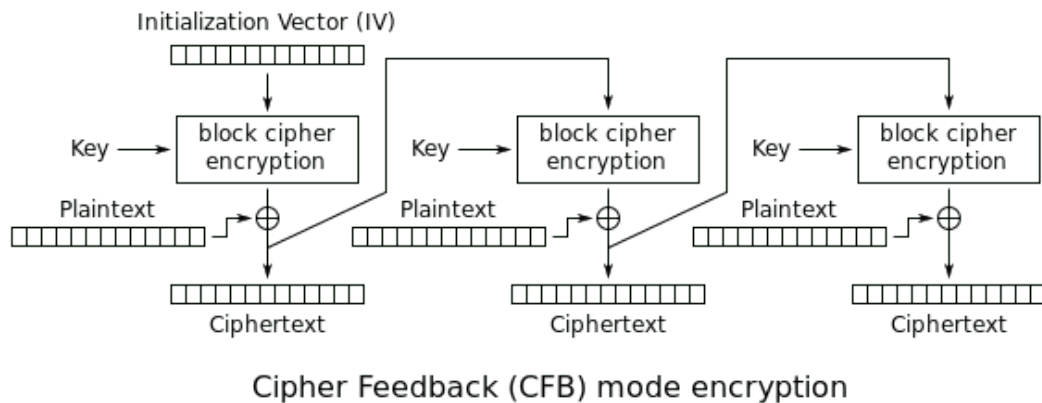


Figura 4.7: CFB

Ricapitolando lo schema presente qui sopra:

- Lega tutti i blocchi (proprio come CBC).
- Genera dei bytes casuali, un flusso usando il cifrario che viene poi successivamente XOR col blocco di testo in chiaro.
- Trasforma il cifrario a blocchi in uno stream cipher (cifrario a flusso).

OFB | Output Feedback

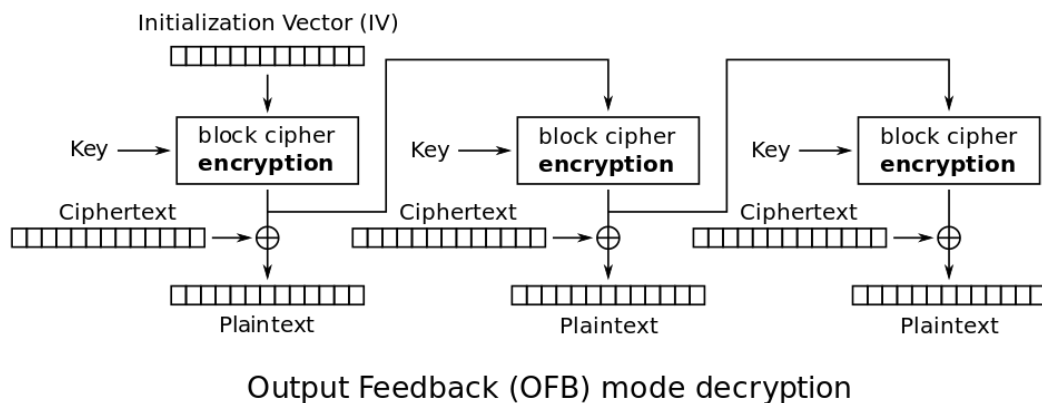


Figura 4.8: OFB

È anch'esso un *stream cipher*, cifra l'iv (genera una serie di caratteri casuali) e poi esegue uno XOR per ottenere il testo cifrato.

Ogni operazione dipende da quelle precedenti.

Ricapitolando le operazioni dell'OFB, proprio come il CFB:

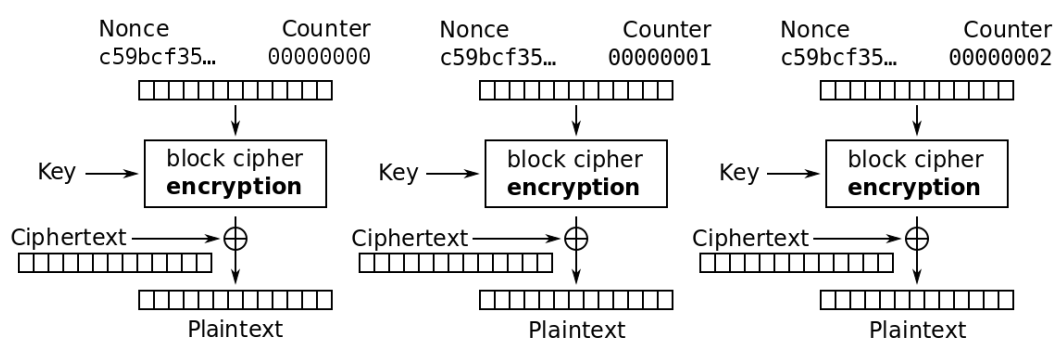
- Lega tutti i blocchi (proprio come CBC e CFB).
- Genera dei bytes casuali, un flusso usando il cifrario che viene poi successivamente XOR col blocco di testo in chiaro.
- Trasforma il cifrario a blocchi in uno stream cipher (cifrario a flusso).

L'unica differenza con CFB è che al posto di utilizzare il testo cifrato nei blocchi successivi, utilizza l'output dei bytes casuali generati dal cifrario attraverso la chiave e l'IV per il blocco successivo.

CTR | Counter Mode

La Counter Mode o CM (*integer counter mode*) o SIC (*segmented integer counter*) usufruisce di un counter (contatore), ovvero di una funzione che genera sequenze irripetibili (nel tempo), al posto di utilizzare un IV.

Il più semplice contatore è il (banale/banalissimo) incrementa di 1. Questa modalità può essere parallelizzata.



Counter (CTR) mode decryption

Figura 4.9: CTR

XTS | AES-XTS (XEX) Tweakable Block Cipher

Questa modalità è utilizzata per cifrare/decifrare i dischi rigidi (hard-disk), quindi la cifratura verrà operata sui segmenti da 512 bytes (ovvero 32 blocchi di AES-128) e i rispettivi settori (del disco).

Questa modalità compie le seguenti operazioni:

- Definite due chiavi: K_1 , K_2 (utilizzando AES-128), Blocco di input, p , numero settore, i e un numero del blocco, j , definiamo il "tweak", X , nel seguente modo:

$$- X = E_{K_2}(i) \otimes 2^j$$

- Di conseguenza, il testo cifrato C è definito così:

$$- C = P \oplus X$$

- ovvero testo cifrato = blocco di input "XORato" con il tweak.

$$- C = E_{K_1}(C) \oplus X$$

- Per poter decryptare, invece, eseguiamo:

$$- X = E_{K_2}(i) \otimes 2^j$$

- il testo in chiaro, per ogni blocco, è:

$$- P = C \oplus X$$

$$- P = E_{K_1}^{-1}(P) \oplus X$$

- In questo modo, il tweak fa da IV.

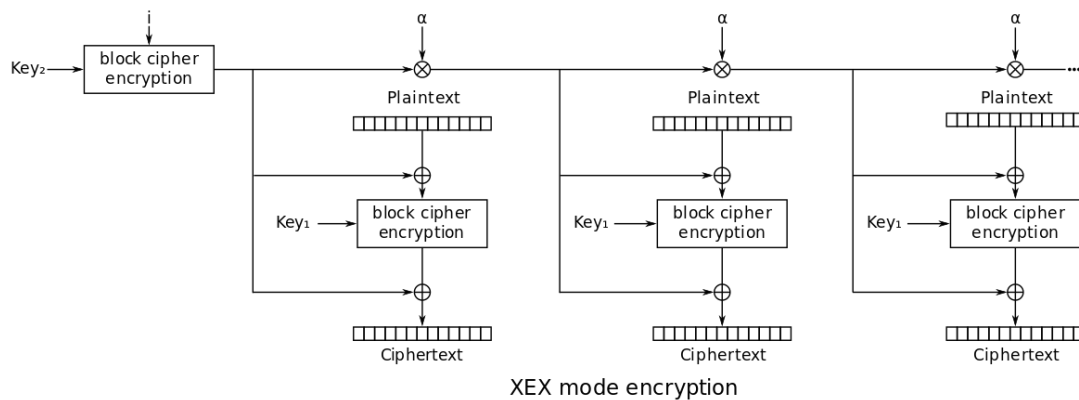


Figura 4.10: XEX

MACS | Message Authentication Codes

I MACS permettono di verificare l'integrità del messaggio per potersi assicurare che non sia stato alterato da parti esterne e che il messaggio giunga integro ai destinatari originali.

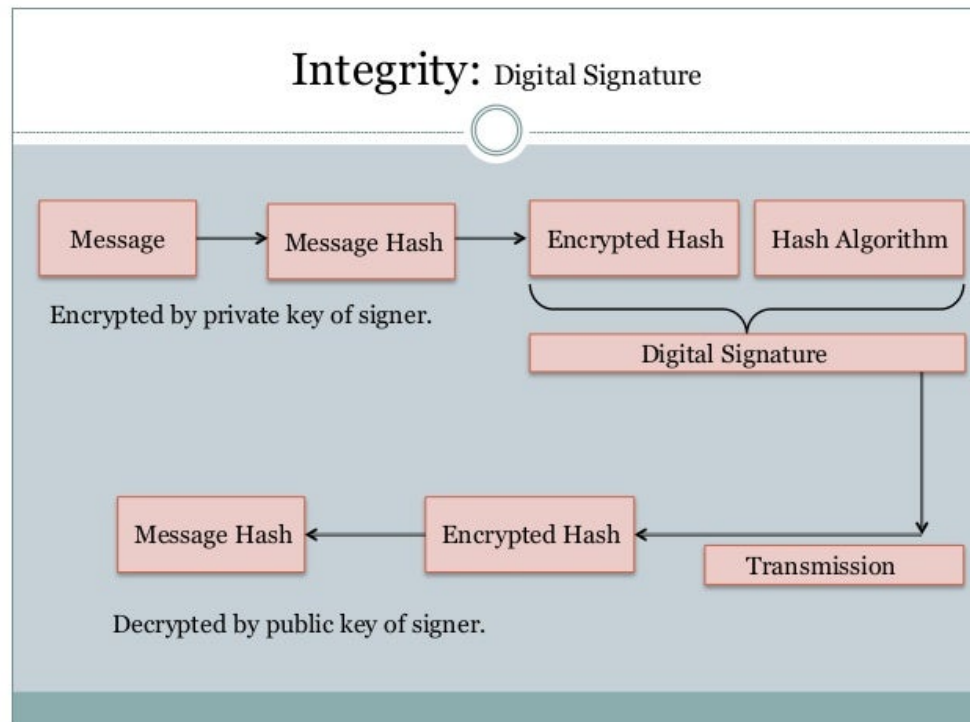


Figura 4.11: Integrità e non ripudio

Quindi, i MACS formano una tipologia di firma digitale dove tutte le parti considerate possono verificare che i dati ricevuti siano validi.

Questo grazie a un meccanismo a 3 componenti:

1. Chiave segreta: chiave segreta condivisa dalle parti.
2. MAC Signing Algorithm: si avvale della chiave e del messaggio per generare un tag (*authentication tag* che permette di verificare che i dati siano integri e non truccati)
3. MAC Validation Algorithm: prende in input la chiave, il messaggio, il tag e restituisce in output la validità del tag, ovvero se il messaggio è stato violato, modificato o no.

ALG1-6

È una collezione di MACs basati su CBC-MAC, di cui alcuni sicuri come il VIL PRF, FIL PRF altri non ne abbiamo certezza.

CMAC | Cipher-based Message Authentication Code

CMAC è una modalità basata su CBC-MAC. Questa crea un messaggio di autenticazione (MAC) utilizzando un cifrario a blocchi e una chiave segreta.

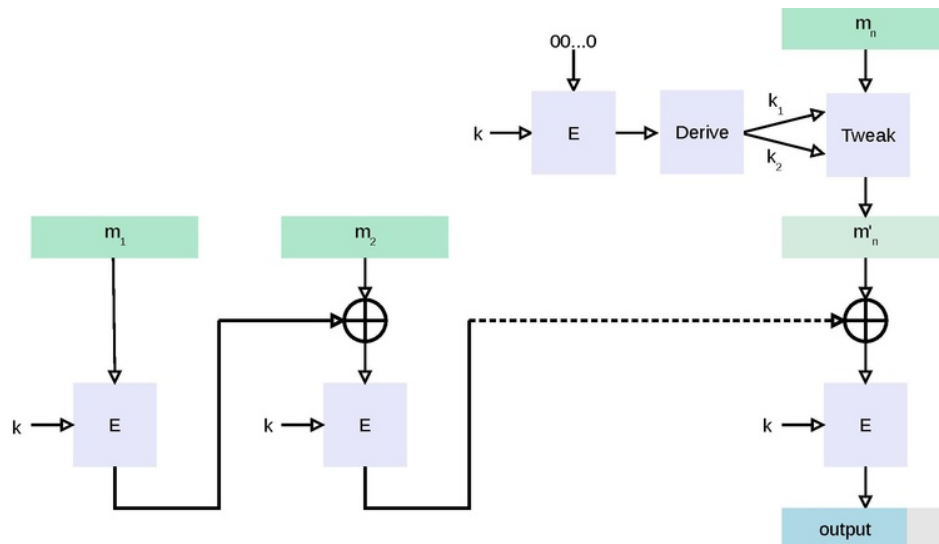


Figura 4.12: CMAC

HMAC | Keyed-hash Message Authentication Code

HMAC è una modalità che permette di autenticare gli emittenti del messaggio attraverso autenticazione basata su algoritmi di hashing, come: MD5, SHA-1, SHA-256 (SHA-2) e SHA-3.

La sicurezza di questa modalità è stata provata.

GMAC | Galois Message Authentication Code

Questa modalità è una specializzazione della modalità **GCM** (*Galois/Counter Mode*). Viene utilizzata per l'autenticazione.

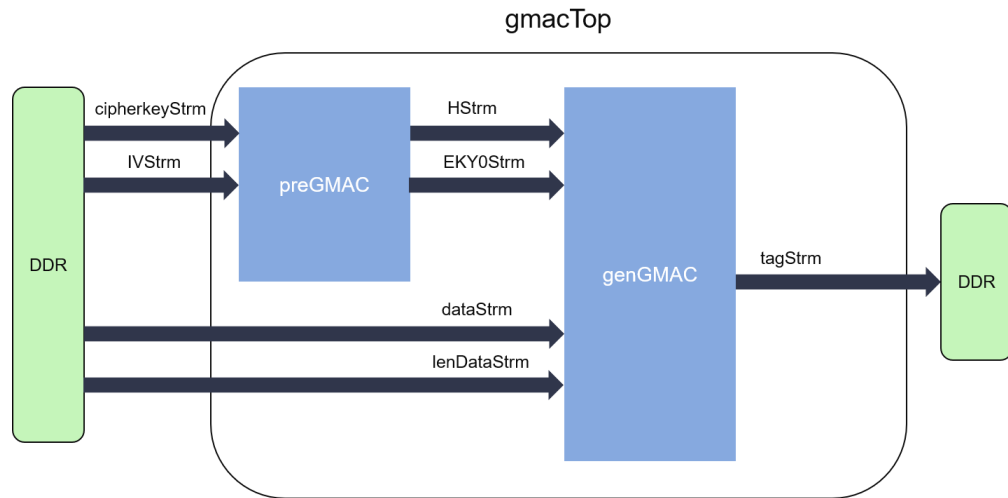


Figura 4.13: GMAC

CBC-MAC

CBC-MAC combina la modalità CBC (Cipher Block Chaining) assieme al MAC per l'autenticazione dei mittenti del messaggio.

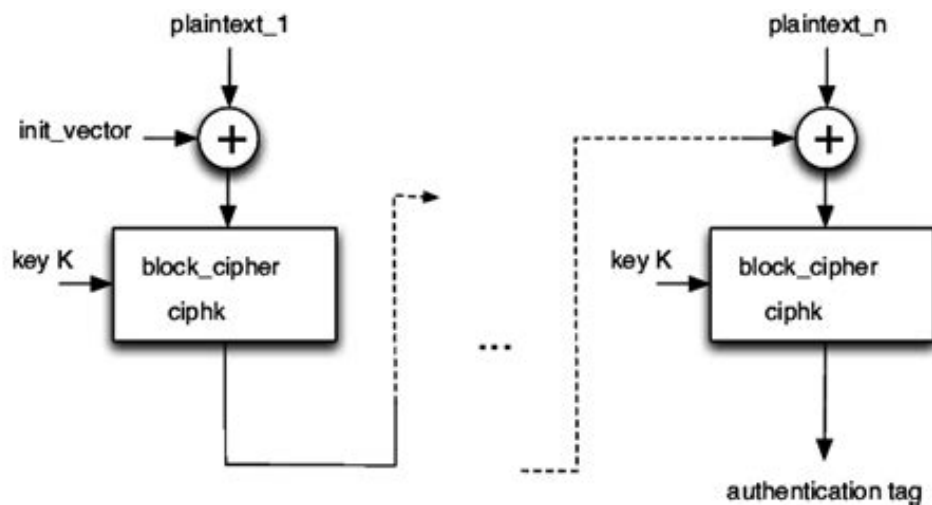


Figura 4.14: CBC-MAC

AEAD | *Authenticated Encryption with Associated Data*

AEAD è un modello di cifratura che assicura sia la riservatezza del messaggio sia la sua autenticazione.

OCB | Offset Codebook

Questa modalità è stata ideata da Phillip Rogaway con l'assistenza di Mihir Bellare, John Black e Ted Krovetz, basata sull'IAPM (*Integrity-Aware Parallelizeable Mode*) che permette di parallelizzare la modalità.

Sono presenti tre versioni di OCB: OCB1, OCB2 e OCB3.

OCB, rispetto alle altre modalità, è molto più veloce.

Erano presenti due brevetti su questa modalità che ne impedivano l'esteso utilizzo, ma dal 2021 questi sono stati abbandonati.

CCM | Counter con CBC-MAC

CCM è un AEAD basato su Nonce che combina le modalità CTR e CBC-MAC i cui blocchi devono essere composti da 128 bits.

GCM | Galois Counter Mode

È un AEAD basato su Nonce che combina le modalità CTR per l'operazione di cifratura e il campo di Galois (Galois Field) $GF(2^{128})$ per l'autenticazione.

Può essere usato come Nonce-MAC, in quel caso viene denominato **GMAC**.

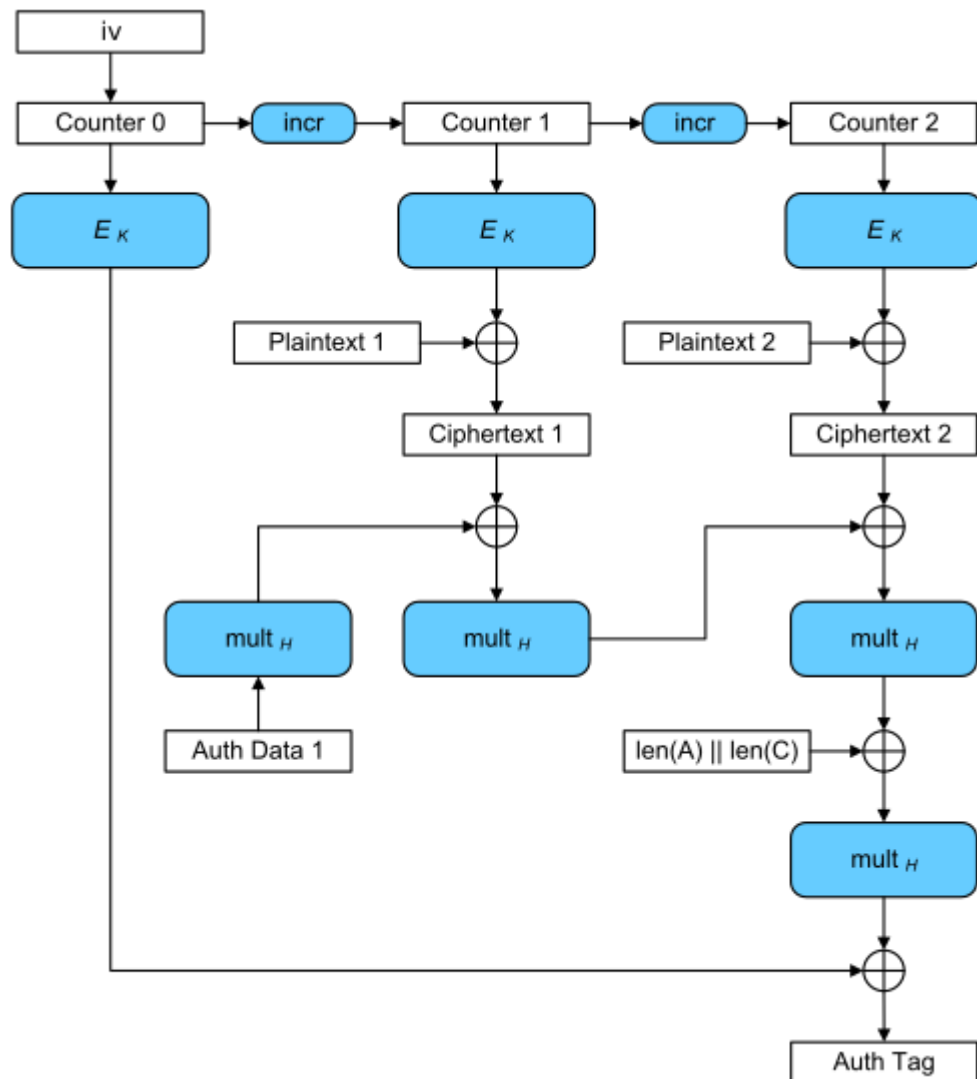


Figura 4.15: GCM

Capitolo 5

L'implementazione

Introduzione

In questo capitolo, presenterò due implementazioni, una elaborata esclusivamente per questo progetto in C++ e un'altra in Java che avevo creato per altri progetti universitari. Quella in C++ risulterà più completa rispetto a quella in Java.

Implementazione in C++

Ho adottato C++23 per questo progetto. In esso sono presenti una interfaccia grafica e una applicazione da linea di comando, entrambe hanno le stesse operazioni.

Innanzitutto, esibirò, le funzioni riguardanti la matematica di Galois di cui mi sono avvalso.

Matematica di Galois

```
/**
 * @brief corresponds to 27 = 00011011 = x^4 + x^3 + x + 1.
 */
static constexpr uint8_t IRREDUCIBLE_POLYNOMIAL = 0x1B;
```

Figura 5.1: Polinomio irriducibile

Riguardo alla matematica nel campo di Galois, ho adoperato tre funzioni: una che implementa l'addizione e la sottrazione, una per la moltiplicazione e una per generare le costanti di round.

Nel campo di Galois, sia l'addizione che la sottrazione sono semplicemente un'operazione di XOR. Questa funzione prende due parametri *x* ed *y* di tipo *uint8_t* (che corrisponde a un *unsigned char*) e restituisce lo XOR tra essi.

```
/**
 * @brief This function returns the galois addition or subtraction between two numbers. It xors the two numbers.
 * @param x: a uint8_t aka unsigned char.
 * @param y: a uint8_t aka unsigned char.
 * @return an xor between x and y.
 */
[[nodiscard("Pure function")]] static constexpr inline uint8_t galois_addition_subtraction(const uint8_t& x, const uint8_t& y) noexcept
{
    return x ^ y;
}
```

Figura 5.2: Addizione e sottrazione nel campo di Galois

galois_multiplication() prende due *uint8_t* come parametri e restituisce la moltiplicazione tra questi nel campo di Galois.

static constexpr indicano che la funzione può essere eseguita a compile time. *noexcept* indica che la funzione non lancia eccezioni. *[[nodiscard]]* indica che il risultato che viene restituito non può essere ignorato, ma deve essere utilizzato.

Facciamo un loop su ogni bit del byte e verifichiamo se il secondo valore *y* ha il bit meno significativo attivo (*y & 0x01*) allora aggiungiamo *x* (ovvero eseguiamo uno XOR) al risultato. Dopodiché verifichiamo se il bit più significativo *high_bit* è attivo in *x*. Poi ruotiamo *x* di 1. Se l'*high_bit* è *true* eseguiamo uno XOR tra *x* e il polinomio irriducibile *IRREDUCIBLE_POLYNOMIAL*, ovvero 0x1B. Infine ruotiamo il secondo valore di 1 per ruotarlo a destra. Poi restituiamo il risultato finale delle operazioni.

```

/**
 * @brief This function returns the multiplication in the galois field of x and y.
 * @param x: a uint8_t aka unsigned char.
 * @param y: a uint8_t aka unsigned char.
 * @return the galois multiplication between x and y.
 */
[[nodiscard]] static constexpr uint8_t galois_multiplication(uint8_t x, uint8_t y) noexcept
{
    uint8_t result = 0;

    for(unsigned short i = 0; i < 8; i++) {
        if(y & 0x01) {
            result ^= x; // ^ è l'addizione in GF(2^8); potrei anche fare result = galois_addition_subtraction(result, x);
        }

        const bool high_bit = x & 0x80; // x >= 0x80 = 128
        x <<= 1; // ruotiamo x di 1 (moltiplicazione in GF(2^8))
        if(high_bit) {
            x ^= IRREDUCIBLE_POLYNOMIAL; // x -= 0x1B, ovvero mod(x^8 + x^4 + x^3 + x + 1)
        }

        y >>= 1; // ruotiamo y a destra (divisione in GF(2^8))
    }

    return result;
}

```

Figura 5.3: Moltiplicazione nel campo di Galois

`round_constant_generator(const uint8_t& x)` prende un numero in input e restituisce la round constant.

Questa funzione è utilizzata per generare la round constant. L'algoritmo di questa funzione è il seguente:

- $\text{round_constant}(1) = 1$.
- $\text{round_constant}(i) = 2 \cdot \text{round_constant}(i - 1)$ se $\text{round_constant}(i - 1) < 0x80$
- $\text{round_constant}(2 \cdot \text{round_constant}(i - 1)) \oplus 0x11B \geq 0x80$

```

/**
 *
 * @param x: a uint8_t aka unsigned char.
 * @return the round constant.
 */
[[nodiscard]] static constexpr inline uint8_t round_constant_generator(const uint8_t& x) noexcept
{
    return (x << 0x01) ^ (((x >> 0x07) & 0x01) * gal::IRREDUCIBLE_POLYNOMIAL);
}

```

Figura 5.4: Generatrice delle costanti di round

Come prima cosa mostrerò l'implementazione dell'algoritmo di AES con tutte le varie operazioni all'interno di ogni round di AES, ovvero: add round key, sub bytes, shift rows e mix columns. Dopodiché presenterò la parte di Key Expansion, ovvero come vengono ottenute le chiavi per ogni round, anch'esso composto da queste fasi: rot word, sub word, rcon.

Add Round Key

Nella fase di `add_round_key()` la chiave di round viene aggiunta alla matrice di stato.

La funzione prende la matrice di stato 4x4 (formata da due `std::array` di grandezza `BLOCK_WORDS` che indica il numero di words in un blocco, ovvero 4) e la chiave del round come puntatore e le aggiunge.

```
void add_round_key(std::array<std::array<uint8_t, aes::BLOCK_WORDS>, aes::BLOCK_WORDS>& state, const uint8_t* key)
{
    for(uint8_t i = 0; i < aes::BLOCK_WORDS; i++) {
        for(uint8_t j = 0; j < aes::BLOCK_WORDS; j++) {
            state[i][j] = state[i][j] ^ key[i + aes::BLOCK_WORDS * j];
        }
    }
}
```

Figura 5.5: Add Round Key

Sub Bytes

Nella funzione `sub_bytes` ogni byte della matrice di stato viene sostituito con quelli presenti nella S-BOX.

Quindi, nella funzione viene passata la matrice di stato come reference, quindi tutte le modifiche verranno applicate anche all'esterno della funzione e poi viene eseguito un loop e ogni elemento viene sostituito con il corrispettivo della S-BOX.

```
void sub_bytes(std::array<std::array<uint8_t, aes::BLOCK_WORDS>, aes::BLOCK_WORDS>& state)
{
    for(auto& s : array<unsigned char, 4> & : state) {
        for(uint8_t& i : s) {
            i = S_BOX[i];
        }
    }
}
```

Figura 5.6: Sub Bytes

Shift Rows

Nel passaggio di *shift rows* le righe della matrice di stato verranno *shiftate* di una posizione la seconda riga, di due posizione la terza e di tre la quarta.

Per fare questo ci avvaliamo di due funzioni, una *shift_row* per shiftare effettivamente le righe e nell'altra *shift_rows* per chiamare la precedente funzione per shiftare delle posizioni stabilite.

```
void shift_row(std::array<std::array<uint8_t, aes::BLOCK_WORDS>, aes::BLOCK_WORDS>& state, const unsigned short& row, const unsigned short& positions)
{
    std::array<uint8_t, aes::BLOCK_WORDS> temp{};
    for(uint8_t i = 0; i < aes::BLOCK_WORDS; i++) {
        temp[i] = state[row][(i + positions) % aes::BLOCK_WORDS];
    }
    state[row] = temp;
}
```

Figura 5.7: Shift Row

```
void shift_rows(std::array<std::array<uint8_t, aes::BLOCK_WORDS>, aes::BLOCK_WORDS>& state)
{
    shift_row(&state, row: aes::FIRST_SHIFT_ROW, positions: 1);
    shift_row(&state, row: aes::SECOND_SHIFT_ROW, positions: 2);
    shift_row(&state, row: aes::THIRD_SHIFT_ROW, positions: 3);
}
```

Figura 5.8: Shift Rows

Mix Columns

La procedura *mix_columns* prende in input la matrice di stato, mescola i suoi bytes.

```
void mix_columns(std::array<std::array<uint8_t, aes::BLOCK_WORDS>, aes::BLOCK_WORDS>& state)
{
    std::array<std::array<uint8_t, aes::BLOCK_WORDS>, aes::BLOCK_WORDS> temp{};

    for(uint8_t i = 0; i < aes::BLOCK_WORDS; ++i) {
        for(uint8_t j = 0; j < aes::BLOCK_WORDS; ++j) {
            for(uint8_t k = 0; k < aes::BLOCK_WORDS; ++k) {
                if(CIRCULANT_MDS[i][j] == 1) {
                    temp[i][k] ^= state[j][k];
                } else {
                    temp[i][k] ^= gal::galois_multiplication(x: CIRCULANT_MDS[i][j], y: state[j][k]);
                }
            }
        }
    }

    state = temp;
}
```

Figura 5.9: Mix Columns

Key Expansion

In questa funzione vengono generate le altre chiavi dei rounds a partire dalla prima chiave. Gli viene passata un array con la chiave, una word e la tipologia di AES: 128, 192 o 256.

Dopodiché eseguiamo le operazioni di: *rot_word*, *sub_word*, e *rcon*. Dopodiché viene eseguito uno XOR tra la chiave e il rcon. Dopodiché si continua a eseguire uno XOR con le chiavi precedenti.

```

void key_expansion(const uint8_t key[], unsigned char word[], const AES& aes)
{
    std::array<uint8_t, aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS> temp{};
    std::array<uint8_t, aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS> rcon{};

    const unsigned short& number_of_keys = aes::get_number_of_keys(aes);
    const unsigned short& number_of_rounds = aes::get_number_of_rounds(aes);

    unsigned int i = 0;
    while(i < aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS * number_of_keys) {
        word[i] = key[i];
        i++;
    }

    i = aes::BLOCK_WORDS * number_of_keys;
    while(i < aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS * aes::BLOCK_WORDS * (number_of_rounds + 1)) {
        temp[0] = word[i - aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS + 0];
        temp[1] = word[i - aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS + 1];
        temp[2] = word[i - aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS + 2];
        temp[3] = word[i - aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS + 3];

        if (i / aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS % number_of_keys == 0) {
            rot_word(&temp);
            sub_word(&temp);
            aes::rcon(&rcon, number_of_keys: i / (number_of_keys * aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS));
            for (unsigned short k = 0; k < aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS; k++) {
                temp[k] = gal::galois_addition_subtraction(x: temp[k], y: rcon[k]);
            }
        } else if (number_of_keys > aes::AES_192_NUMBER_OF_KEYS &&
            i / aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS % number_of_keys == aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS) {
            sub_word(&temp);
        }

        word[i + 0] = gal::galois_addition_subtraction(x: word[i - aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS * number_of_keys], y: temp[0]);
        word[i + 1] = gal::galois_addition_subtraction(x: word[i + 1 - aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS * number_of_keys], y: temp[1]);
        word[i + 2] = gal::galois_addition_subtraction(x: word[i + 2 - aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS * number_of_keys], y: temp[2]);
        word[i + 3] = gal::galois_addition_subtraction(x: word[i + 3 - aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS * number_of_keys], y: temp[3]);

        i += aes::BLOCK_WORDS;
    }
}

```

Figura 5.10: Key Expansion

Rot Word

```

void rot_word(std::array<uint8_t, aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS>& keys)
{
    const uint8_t temp = keys[0];
    keys[0] = keys[1];
    keys[1] = keys[2];
    keys[2] = keys[3];
    keys[3] = temp;
}

```

Figura 5.11: Rot Word

In questa operazione ogni byte (word di 32 bits, ovvero 4 bytes) viene ruotato di 1 posizione.

Sub Word

```
void sub_word(std::array<uint8_t, aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS>& keys)
{
    for(uint8_t i = 0; i < aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS; i++) {
        keys[i] = S_BOX[keys[i]];
    }
}
```

Figura 5.12: Sub Word

Nella procedura *sub_word()* ogni byte della chiave viene sostituita con quella della S-BOX.

Rcon

```
void rcon(std::array<uint8_t, aes::AES_128_NUMBER_OF_KEYS>& keys, const uint8_t& number_of_keys)
{
    uint8_t temp = 1;
    for(uint8_t i = 0; i < number_of_keys - 1; i++) {
        temp = gal::round_constant_generator(x: temp);
    }

    keys[0] = temp;
    keys[1] = keys[2] = keys[3] = 0;
}
```

Figura 5.13: Rcon

Nella funzione *rcon*, le *round constants* vengono generate attraverso una funzione ricorsiva.

Xor Blocks

Con questa funzione eseguiamo uno XOR per ogni bit *i* tra i blocchi *x* e *y* e assegniamo il risultato a ogni bit del blocco *z*.

Il loop viene eseguito in base alla grandezza del blocco.


```
void xor_blocks(const uint8_t* x, const uint8_t* y, uint8_t* z, const unsigned int& block_length)
{
    for(unsigned int i = 0; i < block_length; i++) {
        z[i] = gal::galois_addition_subtraction(x[i], y[i]);
    }
}
```

Figura 5.14: Xor Blocks

Modes

Verranno ora mostrate le implementazione di alcune delle modalità di cifratura, nello specifico: ECB, CBC e CFB.

ECB

ECB è la modalità più semplice e anche quella che non dovrebbe mai essere usata.

In questa modalità, semplicemente, ogni blocco viene cifrato com'è. Nessun vettore di inizializzazione viene utilizzato. Lo stesso input genererà lo stesso identico output.

Questa modalità inoltre accetta solo blocchi divisibili per 16, questo viene garantito attraverso la funzione *verify_length()* che verifica e lancia un'eccezione altrimenti.

```
uint8_t* encrypt_ECB(const uint8_t input[], const unsigned int& input_length, const uint8_t key[], const aes::AES& aes)
{
    verify_length(size: input_length);

    const unsigned short& number_of_rounds = aes::get_number_of_rounds(aes);
    uint8_t* output = new unsigned char[input_length];
    uint8_t* round_keys = new unsigned char[aes::BLOCK_WORDS * aes::BLOCK_WORDS * (number_of_rounds + 1)];

    aes::key_expansion(key, word: round_keys, aes);
    for(unsigned int i = 0; i < input_length; i += aes::BLOCK_WORDS * aes::BLOCK_WORDS * sizeof(unsigned char)) {
        aes::encrypt_block(input: input + i, output: output + i, keys: round_keys, aes);
    }

    delete[] round_keys;

    return output;
}
```

Figura 5.15: Cifratura ECB

Per la decifrazione è lo stesso procedimento, ma inverso.

```

uint8_t* decrypt_ECB(const uint8_t input[], const unsigned int& input_length, const uint8_t key[], const aes::AES& aes)
{
    verify_length(size: input_length);

    const unsigned short& number_of_rounds = aes::get_number_of_rounds(aes);
    uint8_t* output = new unsigned char[input_length];
    uint8_t* round_keys = new unsigned char[aes::BLOCK_WORDS * aes::BLOCK_WORDS * (number_of_rounds + 1)];

    aes::key_expansion(key, word: round_keys, aes);
    for(unsigned int i = 0; i < input_length; i += aes::BLOCK_WORDS * aes::BLOCK_WORDS * sizeof(unsigned char)) {
        aes::decrypt_block(input: input + i, output: output + i, keys: round_keys, aes);
    }

    delete[] round_keys;

    return output;
}

```

Figura 5.16: Decifrazione ECB

CBC

CBC è la modalità di chaining, in cui viene utilizzato un IV (initialization vector) per aggiungere casualità e viene eseguito uno XOR tra il messaggio in chiaro e il testo cifrato.

```

uint8_t* encrypt_CBC(const uint8_t input[], unsigned int input_length, const uint8_t key[], const uint8_t iv, const aes::AES& aes)
{
    verify_length(size: input_length);

    const uint8_t& number_of_rounds = aes::get_number_of_rounds(aes);

    uint8_t* output = new uint8_t[input_length];
    uint8_t block[aes::BLOCK_SIZE];
    uint8_t* round_keys = new uint8_t[aes::BLOCK_WORDS * aes::BLOCK_WORDS * (number_of_rounds + 1)];

    aes::key_expansion(key, word: round_keys, aes);
    std::memcpy(Dst: block, Src: iv, Size: aes::BLOCK_SIZE);
    for(unsigned int i = 0; i < input_length; i += aes::BLOCK_SIZE) {
        aes::xor_blocks(x: block, y: input + i, z: block, block_length: aes::BLOCK_SIZE);
        aes::encrypt_block(input: block, output: output + i, keys: round_keys, aes);
        std::memcpy(Dst: block, Src: output + i, Size: aes::BLOCK_SIZE);
    }

    delete[] round_keys;

    return output;
}

```

Figura 5.17: Cifratura CBC

```

uint8_t* decrypt_CBC(const uint8_t input[], unsigned int input_length, const uint8_t key[], const uint8_t* iv, const aes::AES& aes)
{
    verify_length(size: input_length);

    const uint8_t& number_of_rounds = aes::get_number_of_rounds(aes);

    uint8_t* output = new uint8_t[input_length];
    uint8_t block[aes::BLOCK_SIZE];
    uint8_t* round_keys = new uint8_t[aes::BLOCK_WORDS * aes::BLOCK_WORDS * (number_of_rounds + 1)];

    aes::key_expansion(key, word: round_keys, aes);
    std::memcpy(Dst: block, Src: iv, Size: aes::BLOCK_SIZE);
    for(unsigned int i = 0; i < input_length; i += aes::BLOCK_SIZE) {
        aes::decrypt_block(input: input + i, output: output + i, keys: round_keys, aes);
        aes::xor_blocks(x: block, y: output + i, z: output + i, block_length: aes::BLOCK_SIZE);
        std::memcpy(Dst: block, Src: input + i, Size: aes::BLOCK_SIZE);
    }

    delete[] round_keys;

    return output;
}

```

Figura 5.18: Decifrazione CBC

CFB

In queste funzioni, innanzitutto, verifico che la lunghezza dell'input sia divisibile per 16, poi ottengo il numero di rounds in base a quale AES stiamo utilizzando. Imposto l'output, il blocco, il blocco cifrato e le chiavi di rounds che ottengo dalla key_expansion. Dopodiché ciro il blocco, eseguo uno XOR tra il plaintext e il blocco cifrato. Infine restituisco l'output.

```

uint8_t* encrypt_CFB(const uint8_t input[], unsigned int input_length, const uint8_t key[], const uint8_t* iv, const aes::AES& aes)
{
    verify_length(size: input_length);

    const uint8_t& number_of_rounds = aes::get_number_of_rounds(aes);

    uint8_t* output = new uint8_t[input_length];
    uint8_t block[aes::BLOCK_SIZE];
    uint8_t encrypted_block[aes::BLOCK_SIZE];
    uint8_t* round_keys = new uint8_t[aes::BLOCK_WORDS * aes::BLOCK_WORDS * (number_of_rounds + 1)];

    aes::key_expansion(key, word: round_keys, aes);
    std::memcpy(Dst: block, Src: iv, Size: aes::BLOCK_SIZE);
    for(unsigned int i = 0; i < input_length; i += aes::BLOCK_SIZE) {
        aes::encrypt_block(input: block, output: encrypted_block, keys: round_keys, aes);
        aes::xor_blocks(x: input + i, y: encrypted_block, z: output + i, block_length: aes::BLOCK_SIZE);
        std::memcpy(Dst: block, Src: output + i, Size: aes::BLOCK_SIZE);
    }

    delete[] round_keys;

    return output;
}

```

Figura 5.19: Cifratura CFB

```

uint8_t* decrypt_CFB(const uint8_t input[], unsigned int input_length, const uint8_t key[], const uint8_t* iv, const aes::AES& aes)
{
    verify_length(size: input_length);

    const uint8_t& number_of_rounds = aes::get_number_of_rounds(aes);

    uint8_t* output = new uint8_t[input_length];
    uint8_t block[aes::BLOCK_SIZE];
    uint8_t encrypted_block[aes::BLOCK_SIZE];
    uint8_t* round_keys = new uint8_t[aes::BLOCK_WORDS * aes::BLOCK_WORDS * (number_of_rounds + 1)];

    aes::key_expansion(key, word: round_keys, aes);
    std::memcpy(Dst: block, Src: iv, Size: aes::BLOCK_SIZE);
    for(unsigned int i = 0; i < input_length; i += aes::BLOCK_SIZE) {
        aes::encrypt_block(input: block, output: encrypted_block, key: round_keys, aes); //TODO:
        aes::xor_blocks(x: input + i, y: encrypted_block, z: output + i, block_length: aes::BLOCK_SIZE);
        std::memcpy(Dst: block, Src: input + i, Size: aes::BLOCK_SIZE);
    }

    delete[] round_keys;

    return output;
}

```

Figura 5.20: Decifrazione CFB

Padding

Il padding viene utilizzato per aggiungere dei caratteri prestabiliti alla fine di un messaggio. Abbiamo due funzioni, una per aggiungere il padding, `add_padding` e una per rimuoverlo, `remove_padding`. Entrambe queste funzioni richiedono il messaggio da cui vogliamo aggiungere/rimuovere il padding e quale tipologia di padding applicare.

Otteniamo, innanzitutto, il resto per vedere se il messaggio è perfettamente divisibile del `BLOCK_SIZE`, ovvero 16 oppure no. Dopodiché calcoliamo la lunghezza mancante, sottraendo il `BLOCK_SIZE` al resto.

```

std::vector<uint8_t> add_padding(std::vector<uint8_t>& message, const Paddings& padding)
{
    const unsigned int& remainder = message.size() % aes::BLOCK_SIZE;
    const unsigned int& missing_length = aes::BLOCK_SIZE - remainder;

    if(remainder == 0) {
        switch(padding) {
            // Se il messaggio ha la grandezza del blocco (ovvero 16) allora aggiungiamo un altro blocco formato da il numero 1 iniziale + 15 zeri (16 - 1)
            case Paddings::ONE_ZERO_PADDING:
                AES_INFO("1-0-Padding SELECTED")
                message.push_back('1');
                message.insert(position: message.cend(), n: aes::BLOCK_SIZE - 1, x: '0');
                break;
            // Se il messaggio ha la grandezza del blocco (ovvero 16) o i suoi multipli allora aggiungiamo un altro blocco composto da 15 bytes casuali e
            // nell'ultimo byte inseriamo il numero totale di bytes aggiunti (ovvero 16).
            case Paddings::ISO_10126_PADDING:
                AES_INFO("ISO 10126 PADDING SELECTED")
                message.insert(position: message.cend(), n: aes::BLOCK_SIZE - 1, x: aes::rnd::get_random_byte());
                message.push_back(aes::BLOCK_SIZE);
                break;
            case Paddings::NO_PADDING:
                AES_INFO("NO_PADDING SELECTED")
                break;
            default:
                AES_INFO("OTHER PADDING THAT DOESN'T REQUIRE PADDING IF THE BLOCK IS FULL = EQUAL TO 16")
                break;
        }
    } else {

```

Figura 5.21: Aggiunta del padding (1/2)

Se il resto è 0, ovvero il blocco è formato da esattamente 16 caratteri, allora eseguiamo questo:

- **1-0-Padding:** Aggiungiamo un ulteriore blocco di lunghezza 16, ove il primo elemento è il carattere '1' e il rimanente è composto da zeri.
- **ISO_10126_PADDING:** Aggiungiamo 15 caratteri casuali e nell'ultimo carattere inseriamo il numero di caratteri casuali aggiunti.
- **NO_PADDING** o qualsiasi altro padding: non facciamo nulla.

```

switch(padding) {
    // Aggiungiamo 0 fino a riempire la stringa, se la stringa non è un divisore di 16 (che è la grandezza del blocco)
    // Ma se il blocco è già 16, allora non aggiungiamo gli 0.
    case Paddings::ZERO_PADDING:
        AES_INFO("0-Padding SELECTED")
        message.insert(position: message.cend(), n missing_length, x: '0');
        break;
        // Aggiungiamo un 1 all'inizio del padding e poi tanti zeri quanto missing_length - 1 (quel -1 perché inseriamo quel 1 iniziale)
    case Paddings::ONE_ZERO_PADDING:
        AES_INFO("1-0-Padding SELECTED")
        message.push_back('1');
        message.insert(position: message.cend(), n missing_length - 1, x: '0');
        break;
        // Aggiungiamo tanti zeri e nell'ultimo byte mettiamo il numero totale di bytes aggiunti come singolo valore.
    case Paddings::ANSI_X9_23_PADDING:
        AES_INFO("ANSI X9.23 PADDING SELECTED")
        message.insert(position: message.cend(), n missing_length - 1, x: '0');
        message.push_back(missing_length);
        break;
        // Aggiungiamo dei bytes casuali, tranne nell'ultimo byte in cui inseriamo la somma totale di bytes aggiunti.
    case Paddings::ISO_10126_PADDING:
        AES_INFO("ISO 10126 PADDING SELECTED")
        message.insert(position: message.cend(), n missing_length - 1, x: aes::rnd::get_random_byte());
        message.push_back(missing_length);
        break;
        // Aggiungiamo come padding il numero totale di bytes
    case Paddings::PKCS7:
        AES_INFO("PKCS7 SELECTED")
        message.insert(position: message.cend(), n missing_length, x: missing_length);
        break;
    default:
    case Paddings::NO_PADDING:
        AES_INFO("NO_PADDING SELECTED")
        break;
}

AES_DEBUG("message dopo l'aggiunta del padding: {}", cvt::get_string_from_vector<std::string, uint8_t>(vector message))

return message;

```

Figura 5.22: Aggiunta del padding (2/2)

Se il resto non è pari a 0, quindi il blocco non è pieno, non corrisponde a 16, allora eseguiamo:

- **0-Padding:** Aggiungiamo tanti zeri quanti necessari per riempire il blocco.
- **1-0-Padding:** Aggiungiamo un 1 e poi tanti zeri quanti necessari per riempire il blocco.
- **ANSI_X9_23_PADDING:** Aggiungiamo tanti zeri quanti necessari per riempire il blocco - 1, perché nell'ultimo byte inseriamo il numero degli zeri che abbiamo aggiunto.
- **ISO_10126_PADDING:** Aggiungiamo dei numeri casuali fino a riempire il blocco - 1, tranne che nell'ultimo byte in cui inseriamo il numero di bytes casuali aggiunti.
- **PKCS#7:** Aggiungiamo il numero di bytes che mancano al riempire il blocco in tutti i blocchi rimanenti.

- **NO_PADDING**: Non eseguiamo alcuna operazione al testo in chiaro.

```
std::vector<uint8_t> remove_padding(std::vector<uint8_t>& decrypted_message, const Paddings& padding)
{
    const unsigned int& remainder = decrypted_message.size() % aes::BLOCK_SIZE;

    if(remainder == 0) {
        switch(padding) {
            case Paddings::ONE_ZERO_PADDING:
                AES_INFO("1-0-Padding SELECTED")
                // abbiamo il messaggio che potrebbe essere anche più di 16 e partiamo da 0 con .cbegin() + tutto tranne il blocco aggiunto
                // c.begin() = posizione 0 + (tutto il messaggio - il blocco) = posizione iniziale da cui vogliamo cancellare.
                decrypted_message.erase( first: decrypted_message.cbegin() + static_cast<long long>(decrypted_message.size() - aes::BLOCK_SIZE), last: decrypted_message.cend());
                break;
            case Paddings::ISO_10126_PADDING:
                AES_INFO("ISO 10126 PADDING SELECTED")
                decrypted_message.erase( first: decrypted_message.cbegin() + static_cast<long long>(decrypted_message.size() - aes::BLOCK_SIZE), last: decrypted_message.cend());
                break;
            case Paddings::NO_PADDING:
                AES_INFO("NO_PADDING SELECTED")
                break;
            default:
                AES_INFO("OTHER PADDING THAT DOESN'T REQUIRE PADDING IF THE BLOCK IS FULL = EQUAL TO 16")
                break;
        }
    } else {
```

Figura 5.23: Rimozione del padding (1/2)

```
        switch(padding) {
            case Paddings::ZERO_PADDING:
                AES_INFO("0-Padding SELECTED")
                // dall'inizio del vettore + numero posizioni del remainder - fino alla fine del vettore -> cancello padding.
                decrypted_message.erase( first: decrypted_message.cbegin() + remainder, last: decrypted_message.cend());
                break;
            case Paddings::ONE_ZERO_PADDING:
                AES_INFO("1-0-Padding SELECTED")
                decrypted_message.erase( first: decrypted_message.cbegin() + remainder, last: decrypted_message.cend());
                break;
            case Paddings::ANSI_X9_23_PADDING:
                AES_INFO("ANSI X9.23 PADDING SELECTED")
                decrypted_message.erase( first: decrypted_message.cbegin() + remainder, last: decrypted_message.cend());
                break;
            case Paddings::ISO_10126_PADDING:
                AES_INFO("ISO 10126 PADDING SELECTED")
                decrypted_message.erase( first: decrypted_message.cbegin() + remainder, last: decrypted_message.cend());
                break;
            case Paddings::PKCS7:
                AES_INFO("PKCS7 SELECTED")
                decrypted_message.erase( first: decrypted_message.cbegin() + remainder, last: decrypted_message.cend());
                break;
            default:
                case Paddings::NO_PADDING:
                    AES_INFO("NO_PADDING SELECTED")
                    break;
        }
    }

    return decrypted_message;
}
```

Figura 5.24: Rimozione del padding (2/2)

Per quanto riguarda la rimozione del padding, dal testo decifrato, è la stessa identica operazione dell'aggiunta, ma all'inverso, rimuovendo i bytes che avevamo aggiunto.

API

Per poter interfacciarsi con tutte queste funzioni, ne sono presenti due: *encrypt()* e *decrypt()* che richiedono entrambe il messaggio (cifrato o in chiaro), la chiave, l'eventuale IV, opzionale, perché potrebbe non essere presente se si utilizza la modalità ECB, la tipologia di padding, la modalità e infine quale tipologia di AES.

Cifratura

Nella cifratura, viene aggiunto il padding chiamando *add_padding()* al messaggio in chiaro. Dopodiché, in base alla modalità scelta, viene restituito il messaggio cifrato.

```
std::vector<uint8_t> encrypt(std::vector<uint8_t>& message, std::vector<uint8_t>& key, const std::optional<std::vector<uint8_t>>& iv,
                           const aes::pad::Paddings& padding, const aes::mod::Modes& mode, const aes::AES& aes)
{
    const std::vector<uint8_t>& message_with_padding = aes::pad::add_padding(& message, padding);

    AES_DEBUG("unencrypted message_with_padding: {}", aes::cvt::get_string_from_vector<std::string, uint8_t>(& message_with_padding))

    switch(mode) {
        case mod::Modes::ECB:
            return aes::mod::encrypt_ECB(& message_with_padding, key, aes);
        case mod::Modes::CBC:
            return aes::mod::encrypt_CBC(& message_with_padding, key, & iv.value(), aes);
        case mod::Modes::CFB:
            return aes::mod::encrypt_CFB(& message_with_padding, key, & iv.value(), aes);
        default:
            AES_CRITICAL("Error! Should not be here!")
            std::exit(EXIT_FAILURE);
    }
}
```

Figura 5.25: Cifratura

Decifratura

Nella decifratura, viene decifrato il messaggio in base alla modalità selezionata e dopodiché viene restituito il messaggio dopo la rimozione del padding, se presente.


```

std::vector<uint8_t> decrypt(std::vector<uint8_t>& encrypted_message, std::vector<uint8_t>& key, const std::optional<std::vector<uint8_t>>& iv,
                           const aes::pad::Paddings& padding, const aes::mod::Modes& mode, const aes::AES& aes)
{
    std::vector<uint8_t> plaintext_with_padding{};

    switch(mode) {
        case mod::Modes::ECB:
            plaintext_with_padding = aes::mod::decrypt_ECB( input: encrypted_message, key, aes);
            break;
        case mod::Modes::CBC:
            plaintext_with_padding = aes::mod::decrypt_CBC( input: encrypted_message, key, iv: iv.value(), aes);
            break;
        case mod::Modes::CFB:
            plaintext_with_padding = aes::mod::decrypt_CFB( input: encrypted_message, key, iv: iv.value(), aes);
            break;
        default:
            AES_CRITICAL("Error! Should not be here!")
            std::exit( Code: EXIT_FAILURE);
    }

    AES_DEBUG("deciphered plaintext_with_padding: {}", aes::cvt::get_string_from_vector<std::string, uint8_t>( vector: plaintext_with_padding))

    return aes::pad::remove_padding( &: plaintext_with_padding, padding);
}

```

Figura 5.26: Decifratura

Implementazione in Java

Per l'implementazione in Java, mi sono avvalso di Java 11 e ho usufruito delle librerie standard.

Ho definito, innanzitutto, delle variabili membro statiche, per definire la grandezza della chiave, quale algoritmo utilizzare, quale tipo di padding usufruire e altre inerenti l'iv e la salatura della password.

```
public final class AES {  
  
    1 usage  
    private final static String ENCRYPTION_STANDARD = "AES";  
    1 usage  
    private final static int KEY_SIZE = 256;  
    1 usage  
    private final static String TRANSFORMATION_ALGORITHM = "PBKDF2WithHmacSHA256";  
    2 usages  
    private final static String TRANSFORMATION_ALGORITHM_NO_PADDING = "AES/GCM/NoPadding";  
    1 usage  
    private final static int ITERATION_COUNTER = 65_536;  
    2 usages  
    private final static int IV_SIZE = 12;  
    2 usages  
    private final static int SALT_SIZE = 16;  
    2 usages  
    private final static int TAG_SIZE = 128;  
  
    4 usages  
    public final static String PASSWORD = "SECRET-CODE";  
  
    /**  
     * private constructor because the class doesn't have to be instantiated.  
     */  
    no usages  🧑 Luca  
    private AES(){}  
}
```

Figura 5.27: Costruttore e variabili membre

Attraverso il metodo `getRandomBytes()` otteniamo un Nonce.

```

/**
 *
 * @param bytesNumber : number of bytes
 * We use SecureRandom to create a pseudo-random number
 * which we will use to generate a random IV and Salt.
 * IV: stands for initialization vector, it adds randomness to the start of the encryption process.
 * It may also be called nonce since it's used only once.
 * Salt: it is some bytes that gets added to the password before it goes through the hashing algorithm.
 * @return : random bytes.
 */
2 usages  ▲ Luca
public static byte[] getRandomBytes(final int bytesNumber){
    final SecureRandom secureRandom = new SecureRandom();

    final byte[] bytes = new byte[bytesNumber];
    secureRandom.nextBytes(bytes);

    return bytes;
}

```

Figura 5.28: Nonce

Col metodo *getKeyFromPassword* otteniamo la chiave dalla password assieme alla salatura.

```

/**
 *
 * @param password: it's a user defined password.
 * @param salt: it is some bytes that gets added to the password before it goes through the hashing algorithm.
 * @return : a SecretKey
 * @throws NoSuchAlgorithmException: algorithm doesn't exist.
 * @throws InvalidKeySpecException: invalid key specifications.
 */
2 usages  ▲ Luca
public static SecretKey getKeyFromPassword(final String password, final byte[] salt) throws NoSuchAlgorithmException, InvalidKeySpecException {
    final SecretKeyFactory secretKeyFactory = SecretKeyFactory.getInstance(AES.TRANSFORMATION_ALGORITHM);

    final KeySpec keySpec = new PBEKeySpec(password.toCharArray(), salt, AES.ITERATION_COUNTER, AES.KEY_SIZE);

    return new SecretKeySpec(secretKeyFactory.generateSecret(keySpec).getEncoded(), AES.ENCRYPTION_STANDARD);
}

```

Figura 5.29: Password

Nel metodo *encrypt()* otteniamo la salatura e l'IV attraverso il metodo *getRandomBytes()* e la chiave attraverso *getKeyFromPassword()*. Dopodiché, inizializziamo il cifrario, cifriamo il messaggio e restituiamo il messaggio cifrato, assieme alla salatura e all'IV.

```

/**
 *
 * @param message: the message, in plain text, that has to be encrypted.
 * @param password: it's a user defined password.
 * @return : the encrypted text.
 * @throws NoSuchAlgorithmException: algorithm doesn't exist.
 * @throws InvalidKeySpecException: invalid key specifications.
 * @throws NoSuchPaddingException: padding not available.
 * @throws InvalidAlgorithmParameterException: invalid or inappropriate algorithm parameters.
 * @throws InvalidKeyException: invalid key.
 * @throws IllegalBlockSizeException: provided wrong length of data to the block cipher.
 * @throws BadPaddingException: input data not properly padded.
 */
3 usages  ▲ Luca
public static byte[] encrypt(final byte[] message, final String password) throws NoSuchAlgorithmException, InvalidKeySpecException, NoSuchPaddingException, Inva

    final byte[] salt = AES.getRandomBytes(AES.SALT_SIZE);

    final byte[] iv = AES.getRandomBytes(AES.IV_SIZE);
    //TODO: byte[] iv = params.getParameterSpec(IvParameterSpec.class).getIV(); , meglio quella sotto.
    //TODO: IvParameterSpec ivSpec = new IvParameterSpec(iv);

    final SecretKey secretKey = AES.getKeyFromPassword(password, salt);

    final Cipher cipher = Cipher.getInstance(AES.TRANSFORMATION_ALGORITHM_NO_PADDING);

    cipher.init(Cipher.ENCRYPT_MODE, secretKey, new GCMParameterSpec(AES.TAG_SIZE, iv));

    final byte[] encryptMessage = cipher.doFinal(message);

    //TODO: Base64.getEncoder().encodeToString(encryptMessage);

    //TODO: ivSpec.getIV().length
    return ByteBuffer.allocate( capacity: iv.length + salt.length + encryptMessage.length).put(iv).put(salt).put(encryptMessage).array();
}

```

Figura 5.30: Cifratura

Nel metodo *decrypt()* otteniamo l'IV e il sale dal messaggio e recuperiamo la password, dopodiché inizializziamo il cifrario e decifriamo il messaggio.

```

/**
 *
 * @param message: the encrypted text that has to be decrypted.
 * @param password the user defined password. (it has to match with the one used in the encryption)
 * @return : the decrypted text.
 * @throws NoSuchAlgorithmException: algorithm doesn't exist
 * @throws InvalidKeySpecException: invalid key specifications.
 * @throws NoSuchPaddingException: padding not available.
 * @throws InvalidAlgorithmParameterException: invalid or inappropriate algorithm parameters.
 * @throws InvalidKeyException: invalid key.
 * @throws IllegalBlockSizeException: provided wrong length of data to the block cipher.
 * @throws BadPaddingException: input data not properly padded.
 */
3 usages  Luca
public static byte[] decrypt(final byte[] message, final String password) throws NoSuchAlgorithmException, InvalidKeySpecException, NoSuchPaddingException, InvalidKeyException, IllegalBlockSizeException, BadPaddingException {
    final ByteBuffer byteBuffer = ByteBuffer.wrap(message);

    final byte[] iv = new byte[AES.IV_SIZE];
    byteBuffer.get(iv);

    final byte[] salt = new byte[AES.SALT_SIZE];
    byteBuffer.get(salt);

    //TODO: byte[] bytes = message.digest(password.getBytes(StandardCharsets.UTF_8));

    final byte[] encryptedMessage = new byte[byteBuffer.remaining()];
    byteBuffer.get(encryptedMessage);

    final SecretKey secretKey = AES.getKeyFromPassword(password, salt);

    final Cipher cipher = Cipher.getInstance(AES.TRANSFORMATION_ALGORITHM_NO_PADDING);

    cipher.init(Cipher.DECRYPT_MODE, secretKey, new GCMParameterSpec(AES.TAG_SIZE, iv));

    return cipher.doFinal(encryptedMessage);
}

```

Figura 5.31: Decifratura

In *encryptFile* ci avvaliamo del metodo *encrypt* per cifrare. Leggiamo i dati presenti nel file *inputFilePath* e scriviamo il testo cifrato nel file *outputFilePath*.

```

/**
 *
 * @param inputFilePath: the path of the file with the plain text.
 * @param outputFilePath: the file with the encrypted text that will be created.
 * @param password: the user-defined password.
 * @throws IOException: fail or interrupted I/O operations.
 * @throws NoSuchAlgorithmException: algorithm doesn't exist
 * @throws InvalidKeySpecException: invalid key specifications.
 * @throws NoSuchPaddingException: padding not available.
 * @throws InvalidAlgorithmParameterException: invalid or inappropriate algorithm parameters.
 * @throws InvalidKeyException: invalid key.
 * @throws IllegalBlockSizeException: provided wrong length of data to the block cipher.
 * @throws BadPaddingException: input data not properly padded.
 */
1 usage  Luca
public static void encryptFile(final String inputFilePath, final String outputFilePath, final String password) throws NoSuchAlgorithmException, InvalidKeySpecException, IOException, NoSuchPaddingException, InvalidKeyException, IllegalBlockSizeException, BadPaddingException {
    final byte[] message = Files.readAllBytes(Paths.get(inputFilePath));

    final byte[] encryptedMessage = AES.encrypt(message, password);

    final Path filePath = Paths.get(outputFilePath);

    Files.write(filePath, encryptedMessage);
}

```

Figura 5.32: Funzione per la cifratura di un File

Per *decryptFile* adoperiamo il metodo *decrypt* per decifrare il messaggio cifrato presente nella path indicata dalla variabile *encryptedFilePath*.

```
/**
 *
 * @param encryptedFilePath: the path of the file with the encrypted text.
 * @param password: the user-defined password. (it has to match with the password used in the encryption)
 * @return : the decrypted text in plain text.
 * @throws IOException: fail or interrupted I/O operations.
 * @throws NoSuchAlgorithmException: algorithm doesn't exist
 * @throws InvalidKeySpecException: invalid key specifications.
 * @throws NoSuchPaddingException: padding not available.
 * @throws InvalidAlgorithmParameterException: invalid or inappropriate algorithm parameters.
 * @throws InvalidKeyException: invalid key.
 * @throws IllegalBlockSizeException: provided wrong length of data to the block cipher.
 * @throws BadPaddingException: input data not properly padded.
 */
// usage: Luca
public static byte[] decryptFile(final String encryptedFilePath, final String password) throws NoSuchAlgorithmException, InvalidKeySpecException, NoSuchPaddingException, IOException {

    final byte[] encryptedMessage = Files.readAllBytes(Paths.get(encryptedFilePath));

    return AES.decrypt(encryptedMessage, password);
}
```

Figura 5.33: Funzione per la decifrazione di un File

Capitolo 6

Attacchi e Sicurezza su AES

Introduzione

In questo capitolo, verranno brevemente trattati i possibili attacchi e la sicurezza in generale di AES come cifrario.

Attacchi

In questa sezione, verranno esplicitati alcuni principali tipi di attacchi generici sui cifrari e anche su AES.

CCA | No Chosen Ciphertext Attack

Questo è un tipo di attacco in cui l'attaccante è a conoscenza sia del testo cifrato che di quello decifrato. Riesce a ottenere la decifrazione del testo cifrato attraverso il recupero di informazioni che permettono di ottenere la chiave segreta.

Side Channel Attack

Questi sono tipi di attacchi che sfruttano ogni minima informazione ottenuta, non da difetti nell'algoritmo in sé per sé, ma nel modo in cui questo è stato implementato. Alcune di questi tipi di informazioni che si potrebbero ottenere sono informazioni sul tempo

di esecuzione, consumo di energia elettrica, perdita di radiazioni elettromagnetiche e suoni.

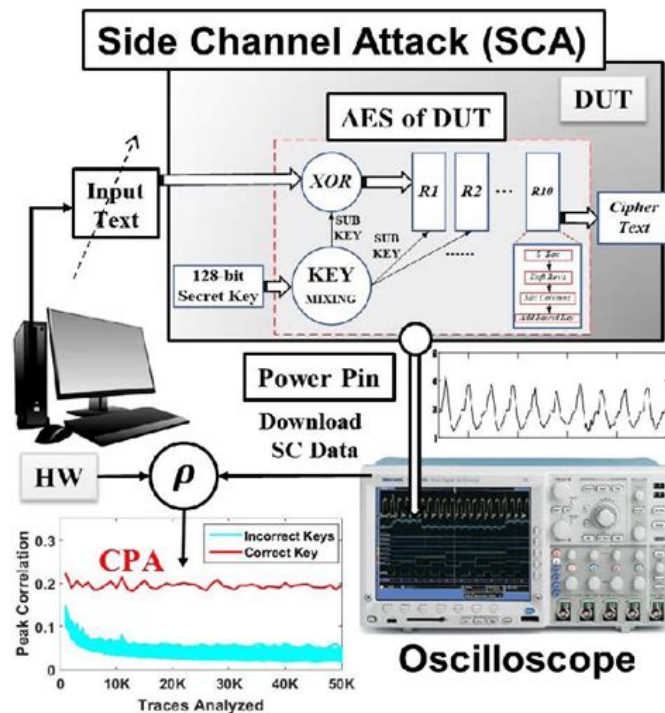


Figura 6.1: Attacco dal canale laterale

Template Attack

Il *template attack* è un tipo di *side channel attack*. Questi tipi di attacchi sono degli attacchi di *profiling* eseguiti sullo specifico dispositivo di una "vittima" per ottenere la sua chiave segreta.

MITM | Man-In-The-Middle

È un tipo di attacco in cui un'attaccante si interpone tra le due parti in comunicazione ed è in grado di leggere e possibilmente alterare gli scambi di informazioni, idealmente senza la conoscenza di queste.

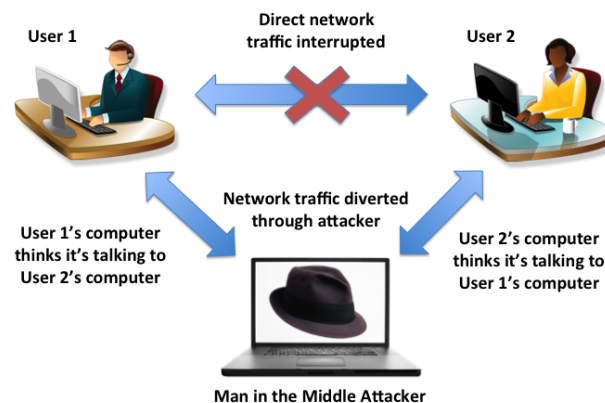


Figura 6.2: Attacco "uomo nel mezzo"

MITM | Meet-In-The-Middle

Questo genere di attacco, da non confondere col *man-in-the-middle*, è basato su una vulnerabilità di spazio-tempo di un algoritmo crittografico che esegue diverse operazioni di cifratura in sequenza.

Biclique Attack

L'attacco *biclique* è un particolare tipo di attacco *MITM* (Meet-In-The-Middle) che utilizza un *biclique* (grafo bipartito completo) per estendere il numero possibile di rounds di attacchi dell'attacco MITM.

Related Key Attacks

L'attacco delle chiavi correlate è un attacco in cui l'attaccante attraverso l'osservazione di varie chiavi, i cui valori sono sconosciuti inizialmente, riesce a ricavarne qualche relazione matematica tra queste.

Known-key distinguishing Attack

È un tipo di attacco in cui l'attaccante è a conoscenza della chiave ed è così in grado di trovare una proprietà del cifrario che permette di trasformazione il testo in chiaro in testo cifrato.

Social Engineering

L'attacco di tipo *ingegneria sociale* è un attacco che riguarda la manipolazione psicologica delle persone per poter ottenere informazioni confidenziali.

Fault Attacks

Questi tipi di attacchi cercano di trarre vantaggio di difetti accidentali o fatti apposta iniettati durante la computazione dell'algoritmo. Riguardo ad AES, sono possibili attacchi di questo tipo in grado di ridurre la grandezza della chiave a 2^8 con una complessità di 2^{30} e anche attacchi sulla *key expansion*.

Cache-Timing Attacks

Questa classe di attacchi in cui l'attaccante tenta di compromettere il sistema crittografico analizzando il tempo di esecuzione dell'algoritmo. Prendono vantaggio degli intervalli di tempo tra la cache e gli accessi alla memoria principale.

Key Recovery Attack | Attacks on Reduced-Round AES

È possibile che con un ridotto numero di rounds, AES è vulnerabile. È stato scoperto, in fase di progettazione che era possibile trovare una scorciatoia con AES con 6 rounds, per questo ne sono stati aggiunti altri 4. È stato possibile recuperare la chiave con un AES fornito di soli 5 rounds.

PA | Padding Attack

Un attacco di padding si basa sul fatto che un messaggio deve essere di una determinata lunghezza per poter essere compatibile alla grandezza della primitiva crittografica, grandezza del blocco per AES. L'attacco conta sul conoscere se al messaggio è stato aggiunto il padding in modo corretto o no.

Alcune modalità che potrebbero soffrire di questo tipo di attacco sono CBC OAEP (Optimal Asymmetric Encryption Padding).

Sicurezza

Verrà trattato, brevemente, il livello di sicurezza, in generale, dell'Advanced Encryption Standard:

La forza del cifrario, in generale, dipende dalla lunghezza della chiave. Tentare un attacco di forza bruta (brute-force attack) su AES-256 richiederebbe troppo tempo e una potenza di calcolo elevatissima, dato l'enorme numero di combinazioni possibili $\sim 1100^{75}$. Questi tipi di attacchi, invece, sono più possibili con AES-128.

Nel 2017 è stato possibile, per dei ricercatori olandesi, ricavare le chiavi di AES-256 utilizzando un *side channel attack* con l'ausilio di un'antenna e con l'elaborazione del segnale.

Gli attacchi con i computer quantistici potrebbero causare problemi.

Conclusioni

Conclusioni

Questo progetto mi è stato di grande beneficio nell'ampliare le mie competenze e comprensioni della crittografia, in generale e in maniera specifica dell'Advanced Encryption Standard (AES).

Luca Rengo

Indice Analitico

Symbols			
0-Padding	29, 56	attacchi	1, 65, 68
1-0-Padding	29, 55, 56	attacco	65, 67
3DES	3, 5	attack	66, 67
		attacks on reduced-round AES	68
A		B	
a blocchi	34	biclique attack	67
a flusso	7	blocchi	7, 32
Abel-Ruffini	24	blocco	30
abeliano	22	block	7
add round key	10, 14, 15, 45, 46	block cipher	7
addizione	25	brute-force attack	68
Advanced Encryption Standard	1, 68, 71		
AEAD	40, 41	C	
AES	1, 3–7, 9, 12, 15, 18, 30, 36, 45, 53, 58, 65, 68, 71	C++	43
ALG1-6	38	C++23	43
algebra astratta	24	cache	68
algebraica	22, 23	cache-timing attacks	68
algoritmi	21	campi	21–23
AND	11	campo	21, 23, 25
anelli	21–23	campo di Galois	24, 44
anello	22, 23	campo finito	25
anello commutativo	23	CBC	18, 33–36, 40, 51, 52, 68
anello finito	23	CBC-MAC	38, 40, 41
ANSI X9.23 Paddding	56	CCA	65
ANSI X9.23 Padding	29	CCM	41
API	58	CFB	18, 34, 36, 51, 53
attaccante	67, 68	chiave	5, 30, 46
		chiavi	12

cifrare	5, 6	gruppo di galois	24
cifrario	7		
cifrario a flusso	35, 36		
cifratrice	5	H	
CMAC	39	hash	29, 39
confusione	9, 14	hashing	39
coppie di campi	23	HMAC	39
CTR	18, 36, 41		
		I	
D		IBM	3
database	29	ingegneria sociale	67
decifrare	5	insieme	23
decifrazione	5	intercampi	26
DES	3, 5	ISO 10126 PADDING	55
Diffie-Hellman	5	ISO 10126 Padding	29, 56
diffusione	9, 14	IV	28, 33, 34, 36, 52, 62
divisione	26	iv	27, 35, 59, 61
DSA	5		
		J	
E		Java	43, 59
ECB	18, 32–34, 51		
ECC	5	K	
El Gamal	5	Kerckhoffs	7
esponenziazione	25	key expansion	12, 45, 48, 53, 68
estensione algebrica	24	key recovery attack	68
estensione di campi	23, 24	key schedule	12, 48
estensione di Galois	26	known-key distinguishing attack	67
estensione di galois	24		
		L	
F		logaritmi	26
fault attack	68	Lucifer	3
file	63		
		M	
G		MAC	37–41
Galois	15, 21, 24, 26, 39, 41, 43, 44	MACS	37, 38
GCM	41	man-in-the-middle	66
GF	24	MARS	4
GMAC	39, 41	matematica	44
gruppi	21, 22	matrice dello stato	18
gruppo	22–24	matrice di stato	10, 15, 46, 47
gruppo abeliano	22, 23	MD5	39
		meet-in-the-middle	67

messaggio 5-7, 32
 mitm 66, 67
 mix columns 10, 14, 18, 45, 47
 modalità 1, 18, 27, 30-32, 36, 51, 58
 modalità di cifratura 30-32
 modalità di cifratura senza integrità
 del messaggio 32
 moltiplicazione 25
 monoide 22

N

NBS 3
 NIST 3, 4
 no chosen ciphertext attack 65
 no padding 29, 55, 56
 nonce 27, 28, 34, 41, 60
 nonce semplice 34
 nonce sequenziali 28
 Nonce-MAC 41
 NOT 11
 NSA 3

O

OAEP 68
 OCB 41
 OFB 18, 35, 36
 OR 11

P

PA 68
 padding 1, 29, 54, 57-59, 68
 Padding Attack 68
 padding oracle attack 29
 passsword 62
 password 28, 29, 59, 61
 pepper 27, 29
 PKCS7 29, 56
 plaintext 53
 profiling 66

R

RC4 5
 RC6 4
 Rcon 13, 14
 rcon 45, 48, 50
 related key attack 67
 Rijndael 3, 4
 rot word 45, 48
 RotWord 13
 round 15, 45, 46
 round constant 12, 14, 45
 round constants 50
 rounds 12, 14, 15, 48, 53, 67, 68
 RSA 5

S

S-BOX 3, 46, 50
 salt 27-29, 59, 61
 segretezza della chiave 9, 14
 Serpent 4
 SHA-1 39
 SHA-2 39
 SHA-256 39
 SHA-3 39
 Shannon 9, 14
 shift rows 10, 14, 17, 45, 47
 sicurezza 1, 68
 side channel attack 65, 66, 68
 simmetrica 9
 social engineering 67
 somma 25
 sottocampi 23
 sottrazione 25
 state matrix 10
 stream 7, 34
 stream cipher 35, 36
 struttura 22, 23
 struttura algebrica 22, 23
 strutture 21
 sub bytes 14, 16, 45, 46
 sub word 45, 48, 50
 sub-bytes 10
 SubWord 13, 14

T

tabella dei generatori	25, 26
template attack	66
teorema di Abel-Ruffini	24
teorema fondamentale della teoria di Galois	26
teoria dei gruppi	24
teoria dell'informazione	9
teoria di campi	24

teoria di galois	24
Twofish	4

X

XOR 11–13, 15, 33–36, 44, 48, 50, 52, 53	
xor blocks	50
XTS	36

Bibliografia

- [1] Wikipedia. Estensione di campi.
- [2] Wikipedia. Estensione algebrica.
- [3] Wikipedia. Gruppo di galois.
- [4] Wikipedia. Estensione di galois.
- [5] Wikipedia. Teorema fondamentale della teoria di galois.
- [6] Morris Dworkin, Elaine Barker, James Nechvatal, James Foti, Lawrence Bassham, E. Roback, and James Dray. Advanced encryption standard (aes), 2001-11-26 2001.
- [7] Jeff Moserware. A stick figure guide to the advanced encryption standard (aes).
- [8] Hackeriet. Math functions in aes and sage.
- [9] Baivab Kumar. What is aes encryption and how does it work?
- [10] Wikipedia. Advanced encryption standard.
- [11] Matt Ahlgren. Che cos'È la crittografia aes-256 e come funziona?
- [12] Rūta Rimkienė. What is aes encryption and how does it work?
- [13] Shashank. What is cryptography? – an introduction to cryptographic algorithms.
- [14] Stack Overflow. How to choose an aes encryption mode (cbc ecb ctr ocb cfb)?

- [15] Prof Bill Buchanan OBE. I know hmac, but what's cmac?
- [16] Michael Grieco. C/c++ math library - 16 - aes encryption.
- [17] Nils Kopal. Aes – the advanced encryption standard explained.
- [18] Ramesh Karri Subidh Ali, Xiaofei Guo and Debdeep Mukhopadhyay. Fault attacks on aes and their countermeasures.
- [19] Bobby Chernev. What is aes and why you already love it?