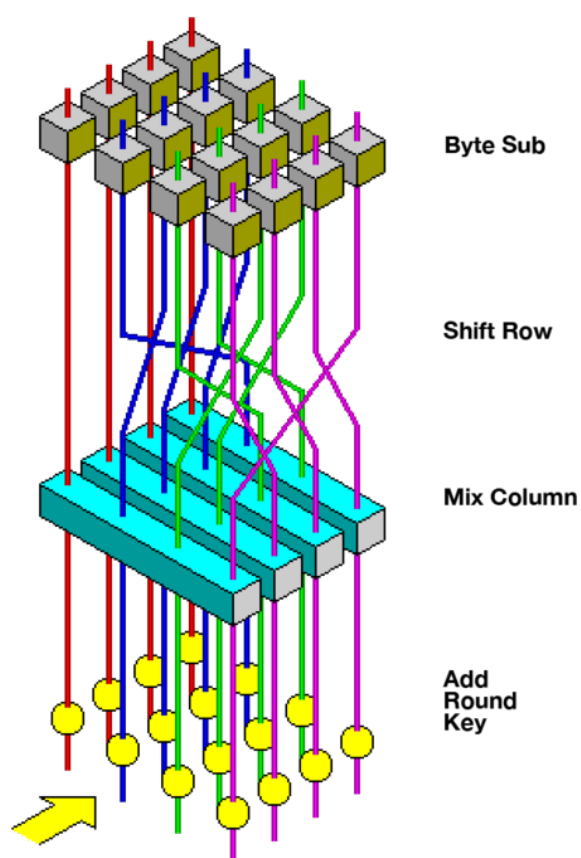


Advanced Encryption Standard

AES

Luca Rengo

v1.0.0
MAGGIO | APRILE
2022 | 2023



Indice

1	Storia di AES	1
1.1	Introduzione	1
1.2	Breve storia di AES	1
1.3	AES vs Rijndael	3
1.4	Cifratura simmetrica vs asimmetrica	3
1.5	Stream vs Block Ciphers	6
1.6	Principio di Kerchoffs	6
2	L'Algoritmo	7
2.1	Introduzione	7
2.2	I tre concetti dietro la Crittografia	7
2.3	Una panoramica sull'Algoritmo	8
	Perché lo XOR è usato in crittografia?	9
	Le modalità di AES	12
3	La Matematica dietro AES	13
3.1	Introduzione	13
3.2	Gruppi, Anelli e Campi	14
	Gruppo	14
	Monoide	14
	Gruppo abelliano	14
	Anello	14
	Anello commutativo	14
	Anello finito	14
	Campo	14
	Campi vs Anelli	14
3.3	Il campo di Galois	14
	Le operazioni del campo finito	14

	Addizione e sottrazione	15
	Moltiplicazione	15
	Esponenziazione	15
	Logaritmi	15
	Divisione	15
	Inverso	15
3.4	Il teorema fondamentale della teoria di Galois	15
4	L'implementazione	17
4.1	Introduzione	17
4.2	Implementazione in C++	17
	Matematica di Galois	17
	Add Round Key	19
	Sub Bytes	19
	Shift Rows	19
	Mix Columns	20
	Key Expansion	21
	Rot Word	22
	Sub Word	22
	Rcon	23
	Xor Blocks	23
	Modes	23
	ECB	23
	CBC	24
	CFB	25
	Paddings	26
	API	28
	Cifratura	29
	Decifratura	29
4.3	Implementazione in Java	30
5	Le modalità di AES	35
5.1	Introduzione	35
5.2	A cosa servono le modalità?	35
5.3	IV, Nonce, Salt e Pepper	35
	Nonce Number Used Once	36
	Nonce sequenziali	36
	IV Initialization Vector	36
	IV vs Nonce	36
	Salt	36
	Pepper	36

5.4	Il padding	37
5.5	Le modalità	37
	Modalità di cifratura senza integrità del messaggio	38
	ECB Electronic Code Book	39
	CBC Cipher Block Chain	39
	CFB Cipher Feedback	40
	OFB Output Feedback	41
	CTR Counter Mode	42
	XTS AES-XTS (XEX) Tweakable Block Cipher	42
	MACS Message Authentication Codes	43
	ALG1-6	43
	CMAC Cipher-based Message Authentication Code	44
	HMAC Keyed-hash Message Authentication Code	44
	GMAC Galois Message Authentication Code	44
	CBC-MAC	45
	AEAD Authenticated Encryption with Associated Data	45
	OCB Offset Codebook	45
	CCM Counter con CBC-MAC	45
	GCM Galois Counter Mode	46

Storia di AES

Introduzione

AES (*Advanced Encryption Standard*) è un cifrario a blocchi simmetrico, inventato da due matematici belgi, 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

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

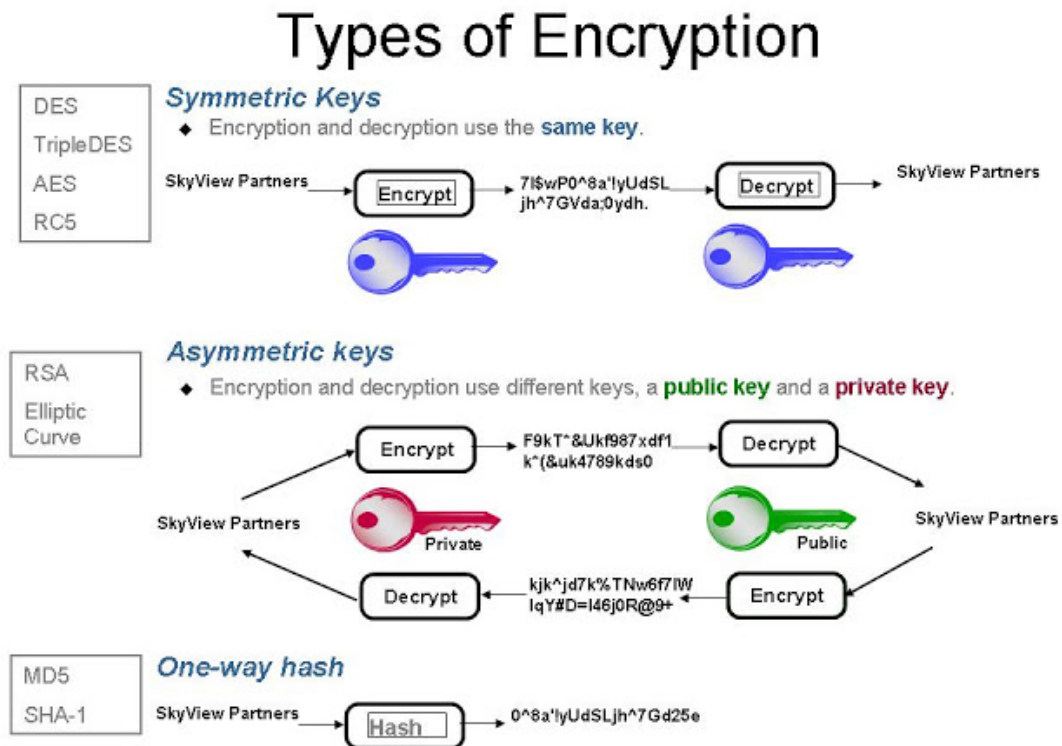


Figura 1.2: Tipi di cifratura

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

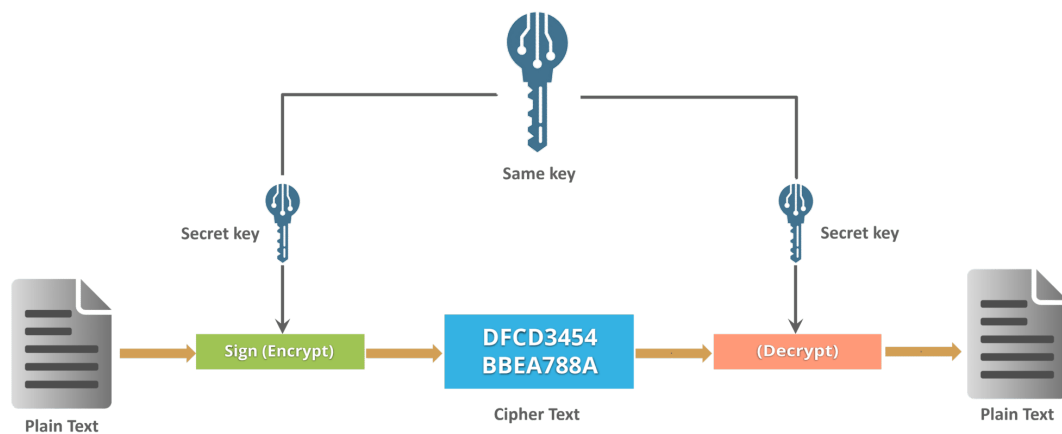


Figura 1.3: Cifratura a chiave simmetrica

Stream vs Block Ciphers

Cifrario a flusso:

Cifrario a blocchi:

Principio di Kerchoffs

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.

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*.

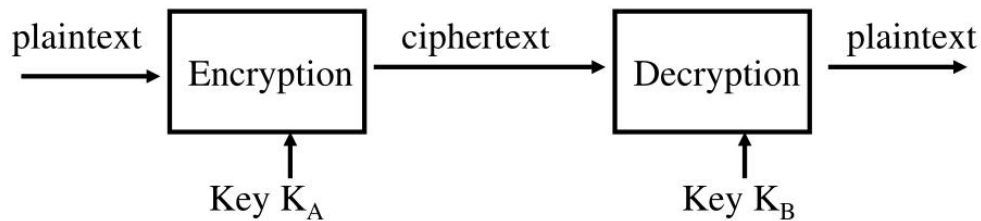
Il principio della *confusione* vela la connessione tra il messaggio originale e il testo cifrato.

La proprietà di *diffusione*, invece, riguarda lo scombussolamento 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.).



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).

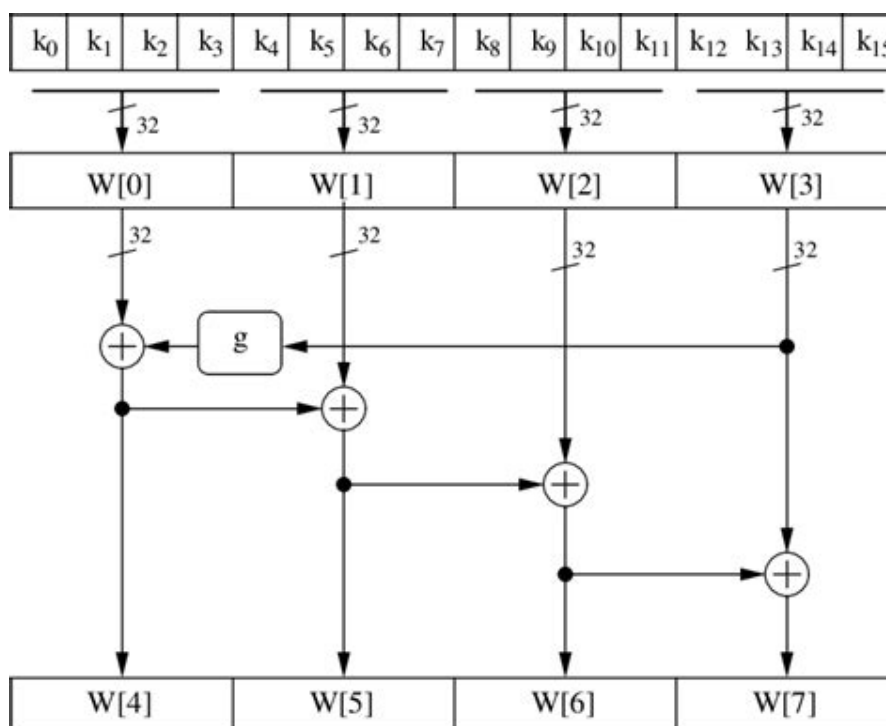


Figura 2.4: Key Expansion

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.

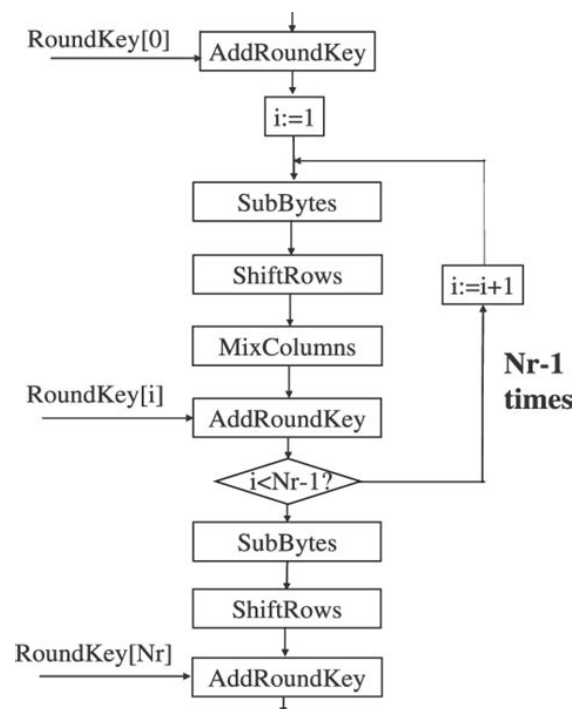


Figura 2.5: AES Rounds Flowchart

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*e di sicurezza.

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 processo/sistema/procedimento per aumentare/incrementare/trasformare/avanzare 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

Gruppi, Anelli e Campi

Gruppo

Monoide

Gruppo abelliano

Anello

Anello commutativo

Anello finito

Campo

Campi vs Anelli

Il campo di Galois

Le operazioni del campo finito

Addizione e sottrazione

Moltiplicazione

Esponenziazione

L'esponenziazione è semplicemente la ripetizione della moltiplicazione.

Logaritmi

Divisione

Inverso

Il teorema fondamentale della teoria di Galois

Capitolo 4

L'implementazione

Introduzione

Implementazione in C++

Matematica di Galois

```
/**
 * @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 4.1: Addizione e sottrazione nel campo di Galois

```

/**
 * @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 4.2: Moltiplicazione nel campo di Galois

```

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

```

Figura 4.3: Moltiplicazione nel campo di Galois 2

Add Round Key

```
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 4.4: Add Round Key

Sub Bytes

```
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 4.5: Sub Bytes

Shift Rows

```
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 4.6: 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 4.7: Shift Rows

Mix Columns

```
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 4.8: Mix Columns

Key Expansion

```

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 4.9: 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 4.10: Rot Word

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 4.11: Sub Word

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::xtime(x: temp);
    }

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

Figura 4.12: Rcon

Xor Blocks

Modes

ECB

```
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 4.13: Cifratura ECB

```

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 4.14: Decifrazione ECB

CBC

```

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 4.15: 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_t 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 4.16: Decifrazione CBC

CFB

```

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_t 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 4.17: 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, keys: 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 4.18: Decifrazione CFB

Padding

```

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 4.19: Aggiunta del padding (1/2)


```

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 4.20: Aggiunta del padding (2/2)

```

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 4.21: 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 4.22: Rimozione del padding (2/2)

API

Cifratura

```
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(Code::EXIT_FAILURE);
    }
}
```

Figura 4.23: Cifratura

Decifratura

```
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(& encrypted_message, key, aes);
            break;
        case mod::Modes::CBC:
            plaintext_with_padding = aes::mod::decrypt_CBC(& encrypted_message, key, & iv.value(), aes);
            break;
        case mod::Modes::CFB:
            plaintext_with_padding = aes::mod::decrypt_CFB(& encrypted_message, key, & 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>(& plaintext_with_padding))

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

Figura 4.24: Decifratura

Implementazione in Java

```
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 4.25: Costruttore e variabili membre

```

/**
 *
 * @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 4.26: Nonce

```

/**
 *
 * @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 4.27: Password

```

/**
 *
 * @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 4.28: Cifratura

```

/**
 *
 * @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, InvalidAlgorithmParameterException, 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 4.29: Decifratura

```

/**
 *
 * @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 {
    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 4.30: Funzione per la cifratura di un File

```
/**
 *
 * @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 4.31: Funzione per la decifrazione di un File

Capitolo 5

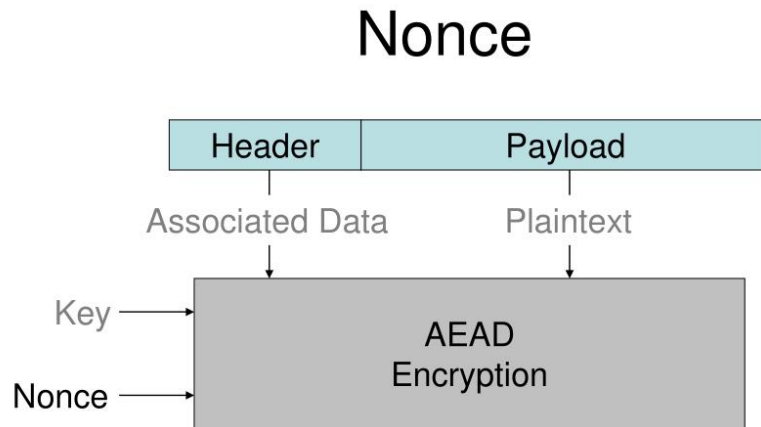
Le modalità di AES

Introduzione

A cosa servono le modalità?

IV, Nonce, Salt e Pepper

Nonce | Number Used Once



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

Figura 5.1: Nonce

Nonce sequenziali

IV | Initialization Vector

IV vs Nonce

Salt

Pepper

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:

Le modalità

Modalità di cifratura senza integrità del messaggio

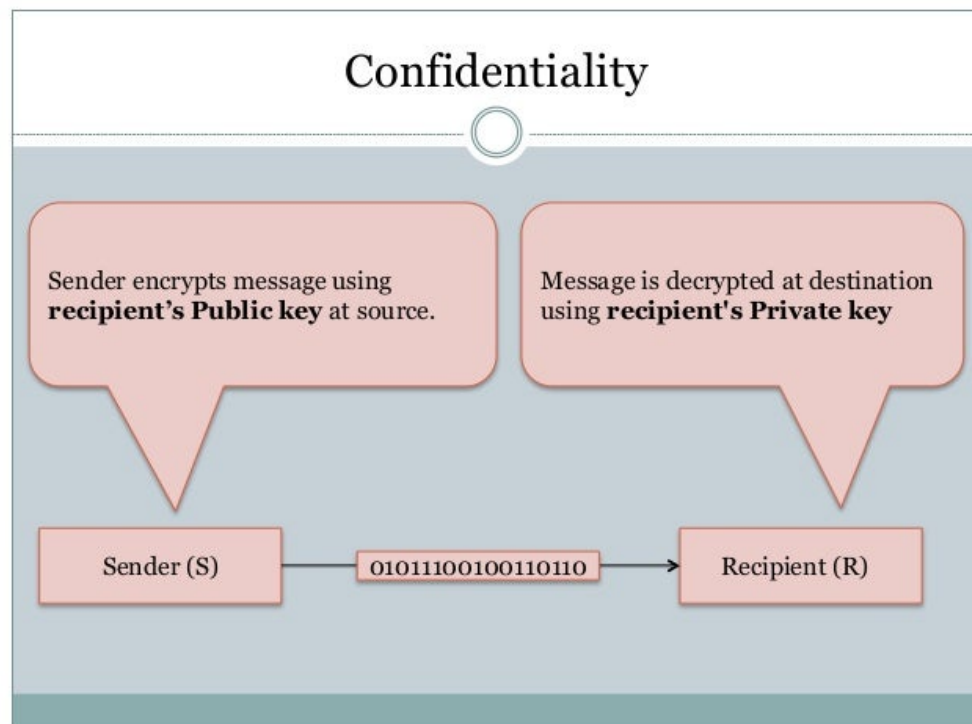


Figura 5.2: Confidenzialità

ECB | *Electronic Code Book*

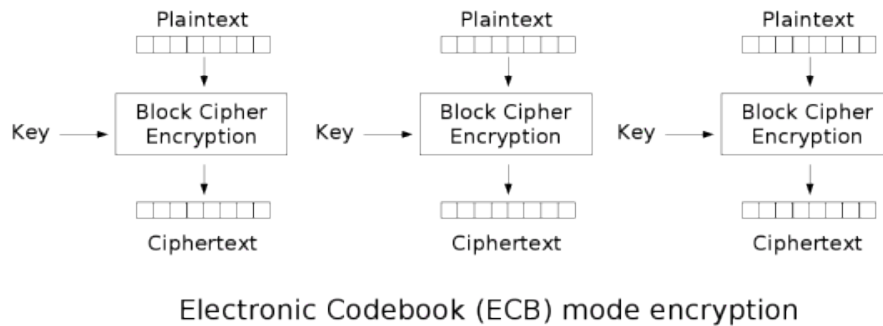


Figura 5.3: ECB

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

CBC | *Cipher Block Chain*

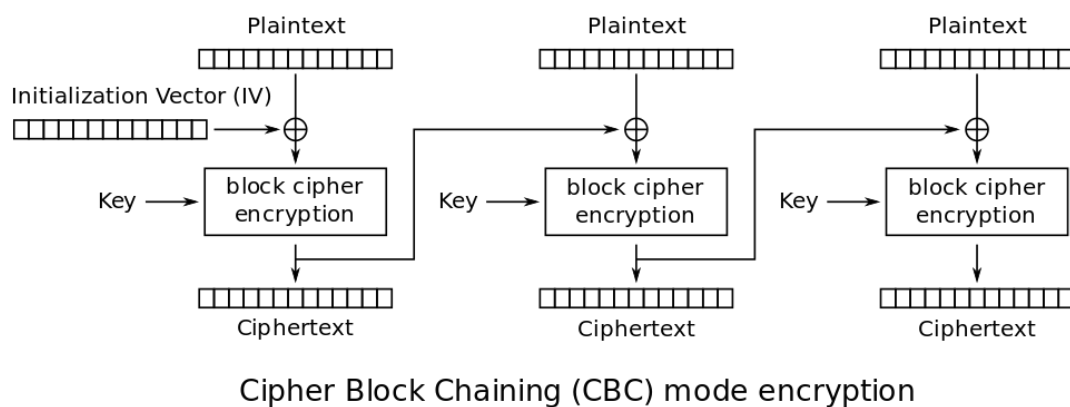


Figura 5.4: CBC

- 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.

CFB | Cipher Feedback

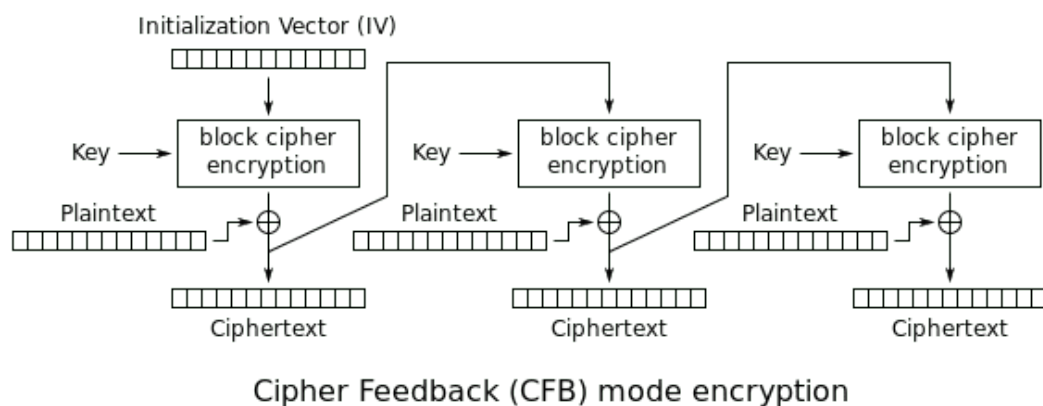


Figura 5.5: CFB

- 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).

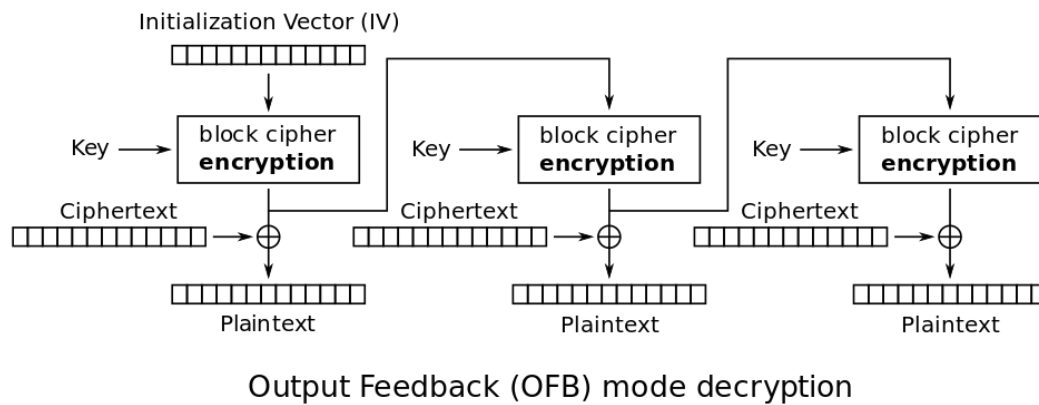
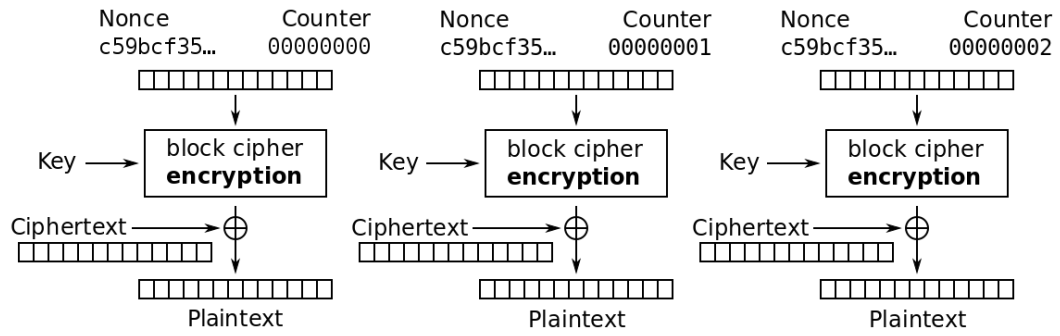
OFB | Output Feedback

Figura 5.6: OFB

- 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



Counter (CTR) mode decryption

Figura 5.7: CTR

XTS | AES-XTS (XEX) Tweakable Block Cipher

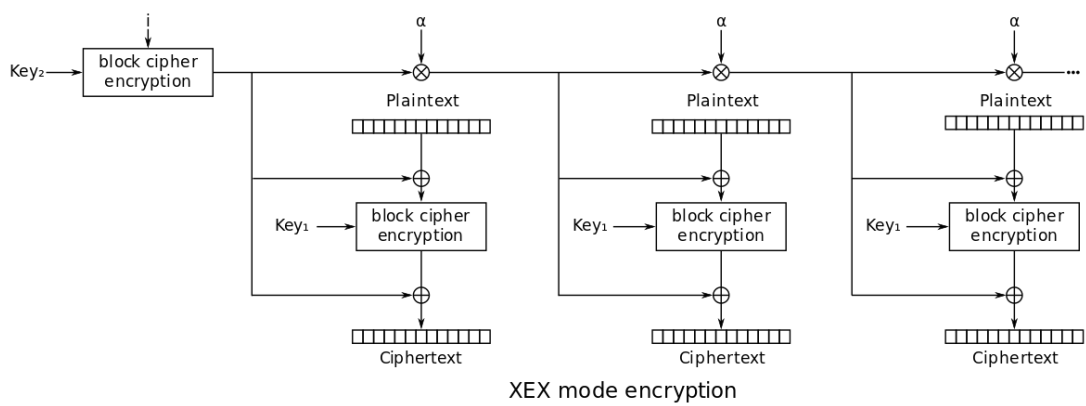


Figura 5.8: XEX

MACS | *Message Authentication Codes*

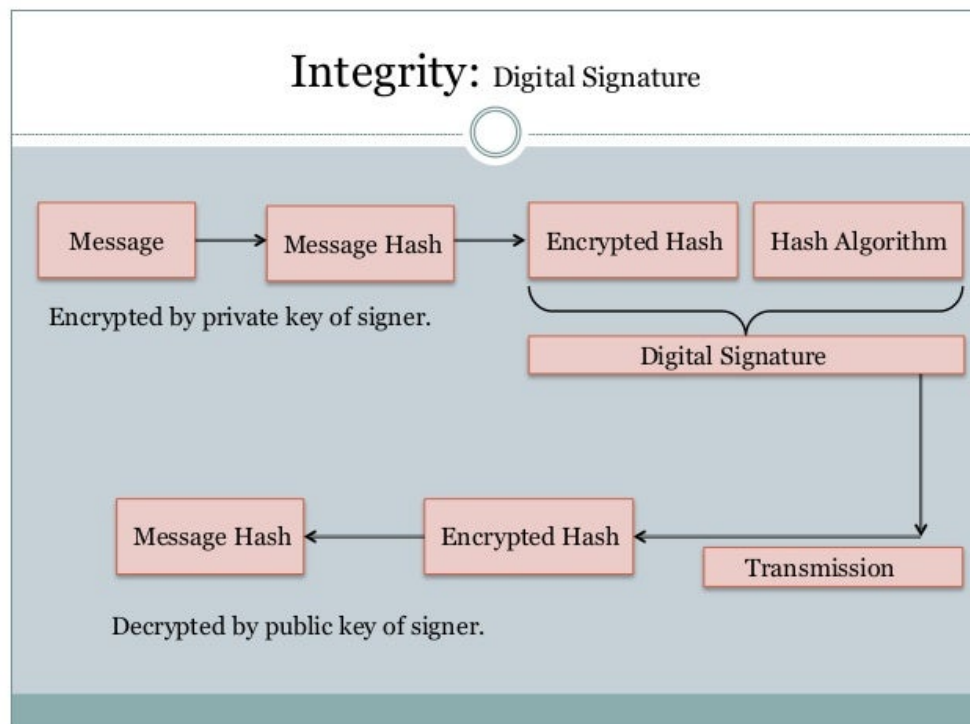


Figura 5.9: Integrità e non ripudio

ALG1-6

CMAC | Cipher-based Message Authentication Code

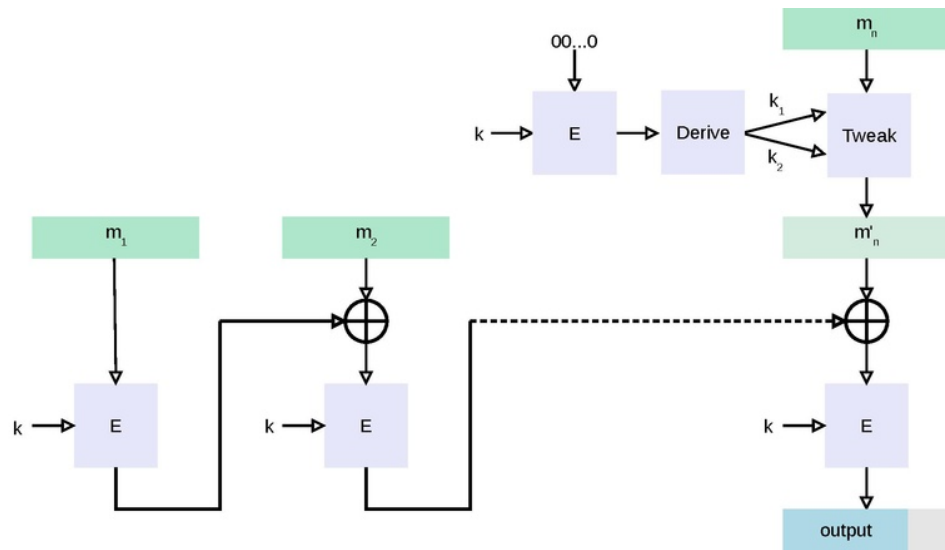


Figura 5.10: CMAC

HMAC | Keyed-hash Message Authentication Code

GMAC | Galois Message Authentication Code

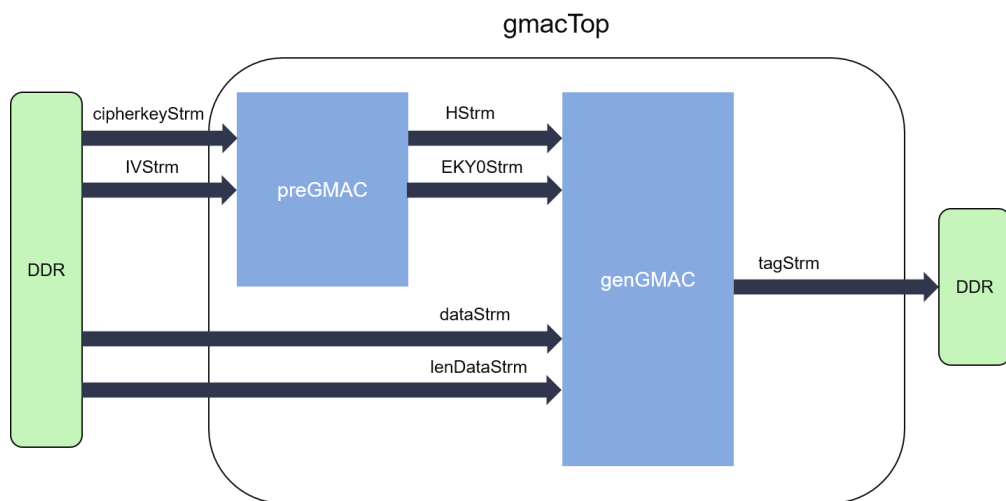


Figura 5.11: GMAC

CBC-MAC

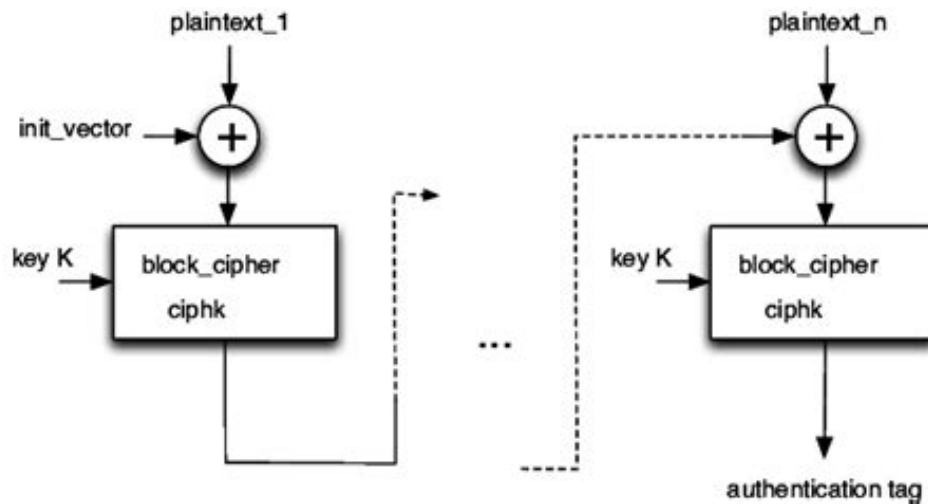


Figura 5.12: CBC-MAC

AEAD | Authenticated Encryption with Associated Data

OCB | Offset Codebook

CCM | Counter con CBC-MAC

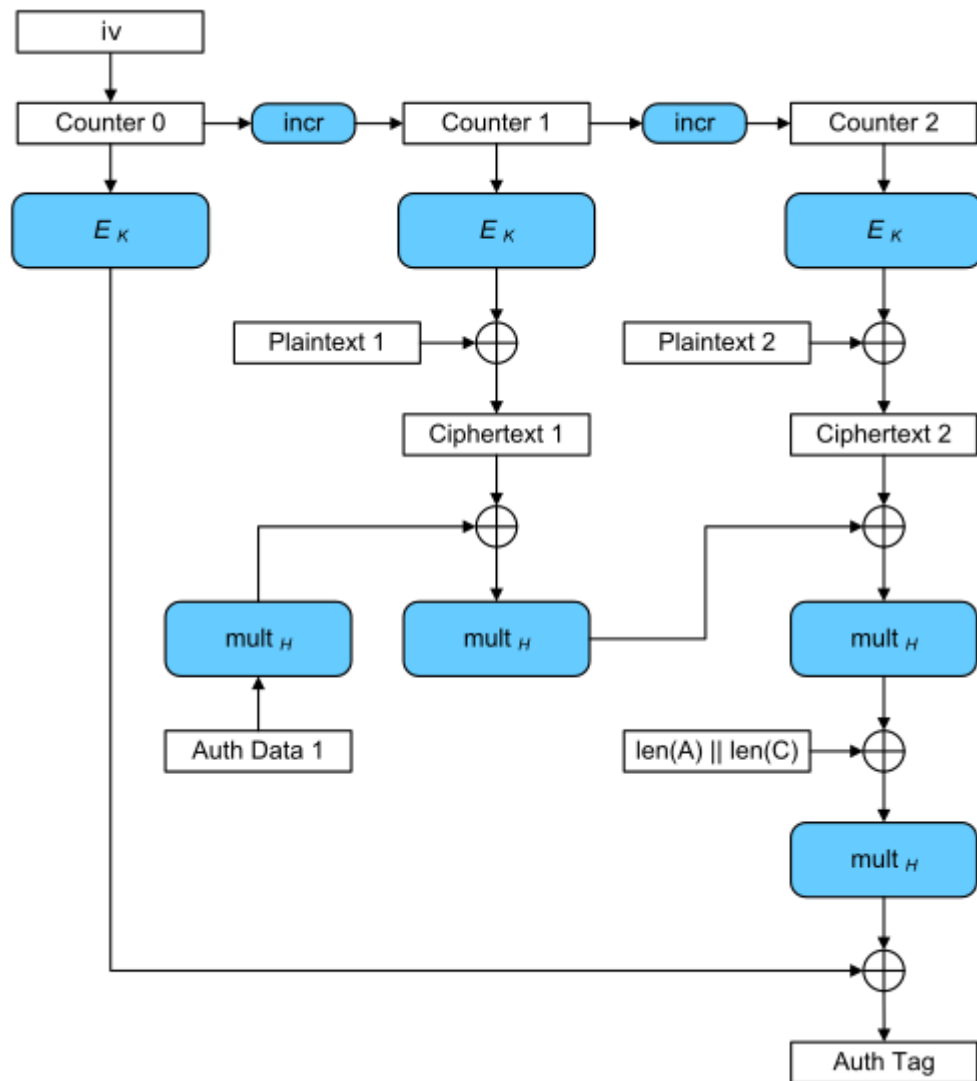
GCM | Galois Counter Mode

Figura 5.13: GCM