

Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Cómputo

Trabajo terminal

Dra. Sandra Díaz Santiago

Generación de *tokens* para proteger los datos de tarjetas bancarias

Trabajo terminal No. 2017-B008

Daniel Ayala Zamorano
Laura Natalia Borbolla Palacios
Ricardo Quezada Figueroa

Enero de 2018

Contenido

Simbología	5
1. Introducción	7
1.1. Justificación	8
1.2. Objetivos	8
2. Antecedentes	9
2.1. Introducción a la criptografía	10
2.1.1. Objetivos de la criptografía	10
2.1.2. Criptoanálisis y ataques	10
2.1.3. Clasificación de la criptografía	11
2.2. Cifrados por bloques	15
2.2.1. Definición	15
2.2.2. Criterios para evaluar los cifrados por bloque	16
2.2.3. Cifrado Feistel	16
2.2.4. Data Encryption Standard (DES)	18
Llaves débiles	19
2.2.5. Advanced Encryption Standard (AES)	19
SubBytes	20
ShiftRows	21
MixColumns	21
AddRoundKey	22
2.2.6. Fast Data Encipherment Algorithm (FEAL)	23

2.2.7.	International Data Encryption Algorithm (IDEA)	24
2.2.8.	Secure And Fast Encryption Routine (SAFER)	25
2.2.9.	RC5	26
2.2.10.	Modos de operación	26
	<i>Electronic Codebook</i> (ECB)	27
	<i>Cipher-block Chaining</i> (CBC)	28
	<i>Cipher Feedback</i> (CFB)	29
	<i>Output Feedback</i> (OFB)	30
2.3.	Cifrados de flujo	32
2.3.1.	Clasificación	32
	Síncronos	32
	Autosincronizables	34
2.3.2.	RC4	34
2.3.3.	El proyecto eSTREAM	35
2.4.	Funciones hash	37
2.4.1.	Integridad de datos	38
2.4.2.	Firmas	38
2.4.3.	Message Digest-4 (MD4)	39
2.4.4.	RIPEMD	39
2.4.5.	<i>Secure Hash Algorithm</i> (SHA)	39
2.5.	Códigos de Autenticación de Mensaje (MAC)	40
Bibliografía		42
Glosario		43

Siglas y acrónimos	45
Lista de figuras	48
Lista de tablas	49
Lista de pseudocódigos	50

Simbología

A continuación se describe la simbología que se utilizará a lo largo de este documento.

Tabla 1: Simbología

Símbolo	Descripción
K	Llave
k_i	I é-sima subllave
E	Operación de cifrado
E_K	Operación de cifrado utilizando la llave K
D	Operación de descifrado
D_K	Operación de descifrado utilizando la llave K
h	Función hash
h_k	Función hash que utiliza una llave k para calcular el valor
M	Mensaje en claro
C	Mensaje cifrado
\mathbb{Z}_n	Conjunto de los números enteros módulo n
$\{0, 1\}^r$	Cadena de bits de longitud r
$\{0, 1\}^*$	Cadena de bits de longitud arbitraria
mód	Operación módulo
mcd	Máximo común divisor
\oplus	Operación XOR
φ	Función ϕ de Euler

Es menester aclarar que un mensaje no consiste solo en letras y números; el *mensaje* se refiere al conjunto de datos que van a ser cifrados o descifrados.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Justificación

1.2. Objetivos

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Introducción a la criptografía

La palabra criptografía proviene de las etimologías griegas *Kriptos* (ocultar) y *Graphos* (escritura), y es definida por la Real Academia Española como el arte de escribir con clave secreta o de un modo enigmático. De manera más formal se puede definir a la criptografía como la ciencia encargada de estudiar y diseñar por medio de técnicas matemáticas, métodos y modelos capaces de resolver problemas en la seguridad de la información, como la confidencialidad de esta, su integridad y la autenticación de su origen.

2.1.1. Objetivos de la criptografía

La criptografía tiene como finalidad proveer los siguientes cuatro servicios.

1. Confidencialidad

Es el servicio encargado de mantener legible la información solo a aquellos que estén autorizados a visualizarla.

2. Integridad

Este servicio se encarga de evitar la alteración de la información de forma no autorizada, esto incluye la inserción, sustitución y eliminación de los datos.

3. Autenticación

Este servicio se refiere a la identificación tanto de las personas que establecen una comunicación, garantizando que cada una es quien dice ser; como del origen de la información que se maneja, garantizando la veracidad de la hora y fecha de origen, el contenido, tiempos de envío, entre otros.

4. No repudio

Es el servicio que evita que el autor de la información o de alguna acción determinada, pueda negar su validez, ayudando así a prevenir situaciones de disputa.

2.1.2. Criptoanálisis y ataques

La criptografía forma parte de una ciencia más general llamada criptología, la cual tiene otras ramas de estudio, como es el criptoanálisis que es la ciencia encargada de estudiar los posibles ataques a sistemas criptográficos, que son capaces de contrariar sus servicios ofrecidos. Entre los principales objetivos del criptoanálisis están, interceptar la información que circula en un canal de comunicación, alterar dicha información y suplantar la identidad, rompiendo con los servicios de confidencialidad, integridad y autenticación respectivamente.

Los ataques que se realizan a sistemas criptográficos dependen de la cantidad de recursos o conocimientos con los que cuenta el adversario que realiza dicho ataque, dando así a la siguiente clasificación.

1. Ataque con sólo texto cifrado

En este ataque el adversario sólo es capaz de obtener la información cifrada, y tratara de conocer su contenido en claro a partir de ella. Esta forma de atacar es la más básica, y todos los métodos criptográficos deben poder soportarla.

2. Ataque con texto en claro conocido

Esta clase de ataques ocurren cuando el adversario puede obtener pares de información cifrada y su correspondiente información en claro, y por medio de su estudio, trata de descifrar otra información cifrada para la cual no conoce su contenido.

3. Ataque con texto en claro elegido

Este ataque es muy parecido al anterior, con la diferencia de que en este el adversario es capaz de obtener los pares de información cifrada y en claro con el contenido que desee.

4. Ataque con texto en claro conocido adaptativo

En este ataque el adversario es capaz de obtener los pares de información cifrada y en claro con el contenido que desee y además tiene amplio acceso o puede usar de forma repetitiva el mecanismo de cifrado.

5. Ataque con texto en claro elegido adaptativo

En este caso el adversario puede elegir información cifrada y conocer su contenido, dado que tiene acceso a los mecanismos de descifrado.

2.1.3. Clasificación de la criptografía

La criptografía puede clasificarse de forma histórica en dos categorías, la criptografía clásica y la criptografía moderna. La criptografía clásica es aquella que se utilizó desde la antigüedad, teniéndose registro de su uso desde hace más 4000 años por los egipcios, hasta la mitad del siglo XX. En esta los métodos utilizados para cifrar eran variados, pero en su mayoría usaban la transposición y la sustitución, además de que la mayoría se mantenían en secreto. Mientras que la criptografía moderna es la que se inició después la publicación de la *Teoría de la información* por Claude Elwood Shannon, dado que esta sentó las bases matemáticas para la criptología en general.

Una manera de clasificar es de acuerdo a las técnicas y métodos empleados para cifrar la información, esta clasificación se puede observar en la figura 2.1.

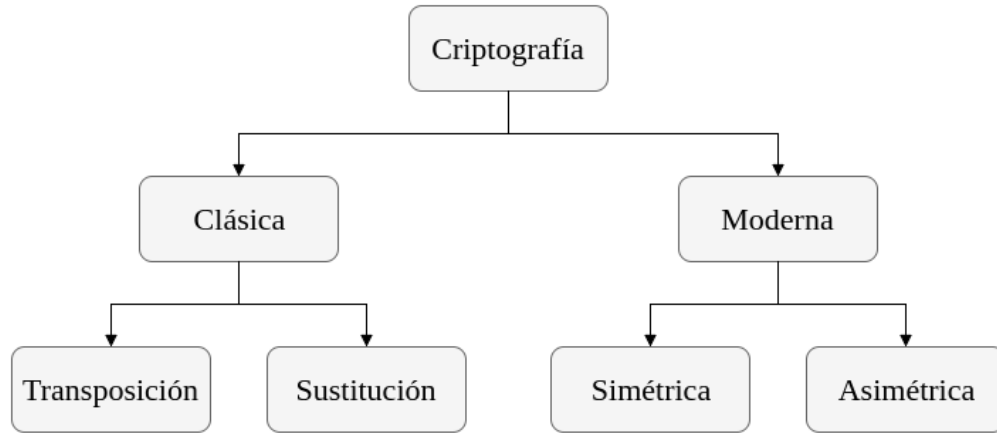


Figura 2.1: Clasificación de la criptografía.

Adentrándose en la clasificación de la criptografía clásica, se tienen los cifrados por transposición, los cuales se basan en técnicas de permutación de forma que los caracteres de la información en claro se reordenen mediante algoritmos específicos, y los cifrados por sustitución, que utilizan técnicas de modificación de los caracteres por otros correspondientes a un alfabeto específico para el cifrado.

En cuanto a la criptografía moderna, esta tiene dos vertientes, la criptografía simétrica o de llave secreta y la asimétrica o de llave pública. Hablando de la primer vertiente, se puede decir que es aquella que utiliza un modelo matemático para cifrar y descifrar un mensaje utilizando únicamente una llave que permanece secreta.

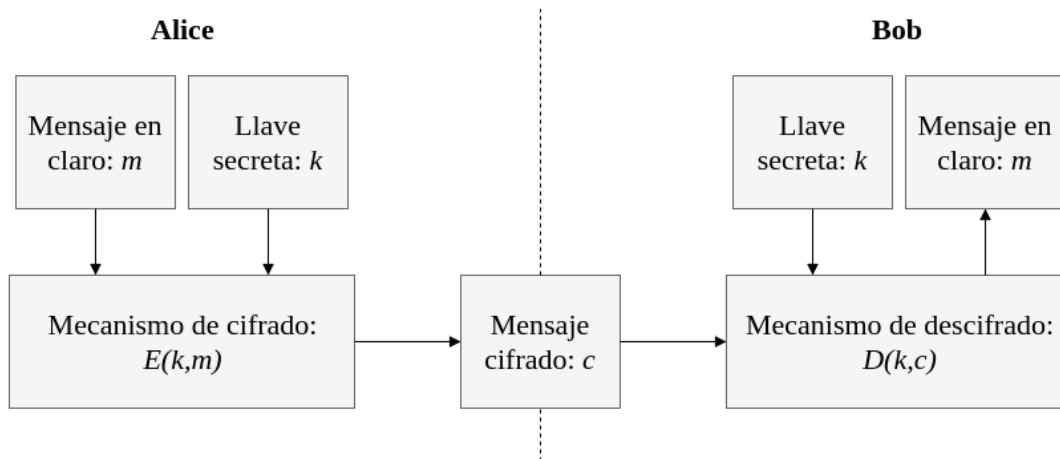


Figura 2.2: Canal de comunicación con criptografía simétrica.

En la figura 2.2 se puede observar el proceso para establecer una comunicación segura por medio de

la criptografía simétrica. Primero, tanto Alice como Bob deben de establecer una llave única y compartida k , para que después, Alice, actuando como el emisor, cifre un mensaje m usando la llave k por medio del algoritmo de cifrado $E(k, m)$ para obtener el mensaje cifrado c y enviárselo a Bob. Posteriormente Bob, como receptor, se encarga de descifrar c con ayuda de la llave k por medio del algoritmo de descifrado $D(k, c)$ para obtener el mensaje original m .

Gran parte de los algoritmos de cifrado que caen en este tipo de criptografía están basados en las redes Feistel, que son un método de cifrado propuesto por el criptógrafo Horst Feistel, mismo que desarrolló el *Data Encryption Standard* (DES) a principios de la década de los 70, que fue el cifrado usado por el gobierno estadounidense hasta 2002, año que el *Advanced Encryption Standard* (AES) lo sustituyó.

Ahora, adentrándose en la criptografía asimétrica, se tiene que su idea principal es el uso de 2 llaves distintas para cada persona, una llave pública para cifrar, que esté disponible para cualquier otra persona, y una llave privada para descifrar, que se mantiene disponible solo para su propietario.

El proceso para establecer una comunicación segura por medio de este tipo de criptografía es el siguiente: primero, Alice nuevamente como el emisor, cifra un mensaje m con la llave pública de Bob pk , y usa el algoritmo de cifrado $E(pk, m)$ para obtener c y enviarlo. Después Bob como receptor, se encarga de descifrar c por medio del algoritmo de descifrado $D(sk, c)$ haciendo uso de su llave privada sk . Este proceso se refleja gráficamente en la figura 2.3.

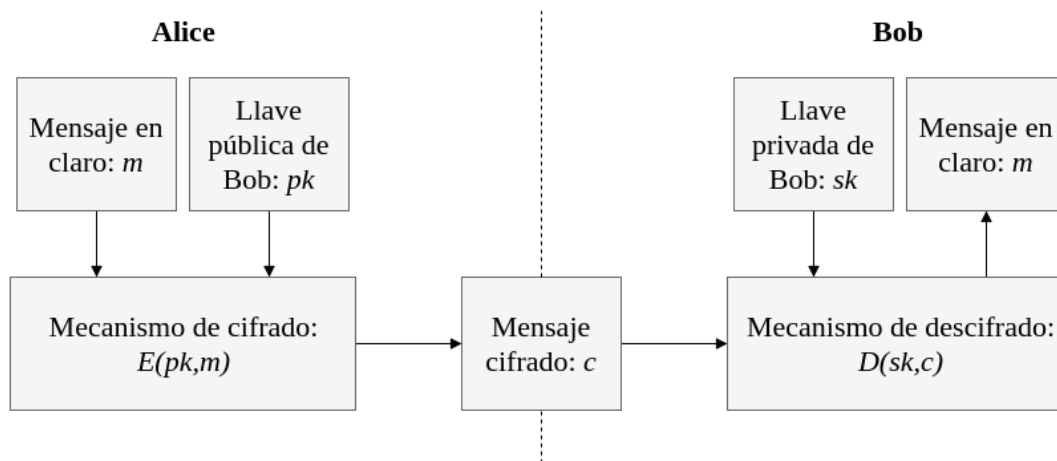


Figura 2.3: Canal de comunicación con criptografía asimétrica.

Entre los usos que se le da a esta criptografía está el mantener la distribución de llaves privadas segura, y establecer métodos que garanticen la autenticación y el no repudio, como por ejemplo en las firmas y certificados digitales.

El principal precursor de la criptografía asimétrica fue el método de intercambio de llaves de Diffie-

Hellman, desarrollado y publicado por Whitfield Diffie y Martin Hellman, en 1976 en el artículo *New Directions in Cryptography*, siendo la primera forma práctica para poder establecer una llave secreta compartida entre dos partes sin contacto previo por medio de un canal público para intercambiar mensajes.

Otro precursor fue el sistema criptográfico RSA (nombre obtenido por las siglas de los apellidos de sus desarrolladores, Ron Rivest, Adi Shamir y Leonard Adleman), publicado en 1978 y que fue el primer sistema criptográfico capaz de servir tanto para cifrar mensajes, como para la implementación de firmas digitales. A pesar de que sus orígenes son de ya hace casi cuatro décadas, este sistema aún es uno de los más ampliamente usados.

Entre los motivos del éxito de RSA está que su funcionamiento se basa en la teoría elemental de números, ya que usa propiedades descritas en esta teoría; y en su seguridad, ya que se basa en la incapacidad de poder factorizar números grandes de forma eficiente.

El algoritmo de RSA consta de 3 partes, la generación de llaves, el cifrado y el descifrado. El proceso para poder generar un par de llaves (pública y privada) con RSA se muestra en el pseudocódigo 2.1.

```

entrada: ninguna.
salida: llave pública  $(n, e)$  y privada  $(n, d)$ .
inicio
    Elegir de forma aleatoria 2 números primos  $p$  y  $q$ , que sean de gran
    magnitud y de una longitud parecida.
    Calcular el módulo  $n = p \cdot q$ 
    Calcular  $\varphi(n) = (p-1)(q-1)$ .
    Elegir un exponente de cifrado  $e$  tal que  $e < \varphi(n)$  y  $\text{mcd}(e, \varphi(n)) = 1$ .
    Encontrar el exponente de descifrado  $d$  tal que  $e \cdot d \bmod \varphi(n) = 1$ .
fin

```

Pseudocódigo 2.1: Proceso de generación de llaves de RSA.

Las funciones de cifrado y descifrado, están definidas en las ecuaciones 2.1 y 2.2 respectivamente, y se aplican números enteros o bloques de bits, siendo funciones biyectivas e inversas entre sí.

$$E : \mathbb{Z}_n \longrightarrow \mathbb{Z}_n, x \longmapsto x^e \quad (2.1)$$

$$D : \mathbb{Z}_n \longrightarrow \mathbb{Z}_n, x \longmapsto x^d \quad (2.2)$$

2.2. Cifrados por bloques

La información presentada a continuación puede consultarse con más profundidad en las siguientes referencias [1], [2].

Los cifrados por bloque son esquemas de cifrado que, como bien lo explica su nombre, operan mediante bloques de datos. Normalmente los bloques tienen una longitud de 64 o de 128 bits, mientras que las llaves pueden ser de 56, 128, 192 o 256 bits.

En muchos sistemas criptográficos, los cifrados por bloque simétricos son elementos importantes, pues su versatilidad permite construir con ellos generadores de números pseudoaleatorios, cifrados de flujo MACs y funciones hash. Sirven también como componentes centrales en técnicas de autenticación de mensajes, mecanismos de integridad de datos, protocolos de autenticación de entidad y esquemas de firma electrónica que usan llaves simétricas.

Los cifrados por bloque están limitados en la práctica por varios factores, tales como el límite de memoria, la velocidad requerida o restricciones impuestas por el hardware o el software en el que se implementan. Normalmente, se debe escoger entre eficiencia y seguridad

Idealmente, al cifrar por bloques, cada bit del bloque cifrado depende de todos los bits de la llave y del texto en claro; no debería existir una relación estadística evidente entre el texto en claro y el texto cifrado; el alterar tan solo un bit en el texto en claro o en la llave debería alterar cada uno de los bits del texto cifrado con una probabilidad de $\frac{1}{2}$; y alterar un bit del texto cifrado debería provocar resultados impredecibles al recuperar el texto en claro.

2.2.1. Definición

$$\begin{aligned} E : \{0, 1\}^r \times \{0, 1\}^n &\longrightarrow \{0, 1\}^n \\ (k, m) &\longmapsto E(k, m) \end{aligned} \tag{2.3}$$

Utilizando una llave secreta k de longitud binaria r el algoritmo de cifrado E cifra bloques en claro m de una longitud binaria fija n y da como resultado bloques cifrados $c = E(k, m)$ cuya longitud también es n . n es el tamaño de bloque del cifrado. El espacio de llave está dado por $K = \{0, 1\}^r$, para cada llave existe una función $D_k(c)$ que permite tomar un bloque cifrado c y regresarlo a su forma original m .

Generalmente, los cifrados por bloque procesan el texto claro en bloques relativamente grandes ($n \geq 64$), contrastando con los cifradores de flujo, que toman bit por bit. Cuando la longitud del mensaje en claro excede el tamaño de bloque, se utilizan los modos de operación.

Los parámetros más importantes de los cifrados por bloque son los siguientes:

- Tamaño de bloque
- Tamaño de llave

2.2.2. Criterios para evaluar los cifrados por bloque

A continuación se listan algunos de los criterios que pueden ser tomados en cuenta para evaluar estos cifrados:

1. **Nivel de seguridad.** La confianza que se le tiene a un cifrado va creciendo con el tiempo, pues va siendo analizado y sometido a pruebas.
2. **Tamaño de llave.** La entropía del espacio de la llave define un límite superior en la seguridad del cifrado al tomar en cuenta la búsqueda exhaustiva. Sin embargo, hay que tener cuidado con su tamaño, pues también aumentan los costos de generación, transmisión, almacenamiento, etcétera.
3. **Tamaño de bloque.** Impacta la seguridad, pues entre más grandes, mejor; sin embargo, tiene repercusiones en el costo de la implementación, además de que puede afectar el rendimiento del cifrado.
4. **Expansión de datos.** Es extremadamente deseable que los datos cifrados no aumenten su tamaño respecto a los datos en claro.
5. **Propagación de error.** Descifrar datos que contienen errores de bit puede llevar a recuperar incorrectamente el texto en claro, además de propagar errores en los bloques pendientes por descifrar. Normalmente, el tamaño de bloque afecta el error de propagación.

A continuación se listan algunos algoritmos de cifrado por bloques.

2.2.3. Cifrado Feistel

Consiste en un cifrado iterativo que mapea bloques de texto en claro de tamaño $2t$ bits (separados en bloques L_0, R_0 de tamaño t) a un texto cifrado R_r, L_r mediante un proceso de r rondas.

```

inicio
para_todo  $i$  desde 1 hasta  $r$ :
     $L_i = R_{i-1}$ 
     $R_i = L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, K_i)$ 
fin
fin
    
```

Pseudocódigo 2.2: Feistel, cifrado.

Donde cada subllave K_i se obtiene de la llave K .

Normalmente el número de rondas r es mayor o igual a tres y par. Además, casi siempre intercambia el orden de los bloques de salida al revés en la última ronda: (R_r, L_r) en vez de (L_r, R_r) .

El descifrado se realiza utilizando el mismo proceso de cifrado pero con las llaves en el orden inverso (comenzando con K_r hasta K_1).

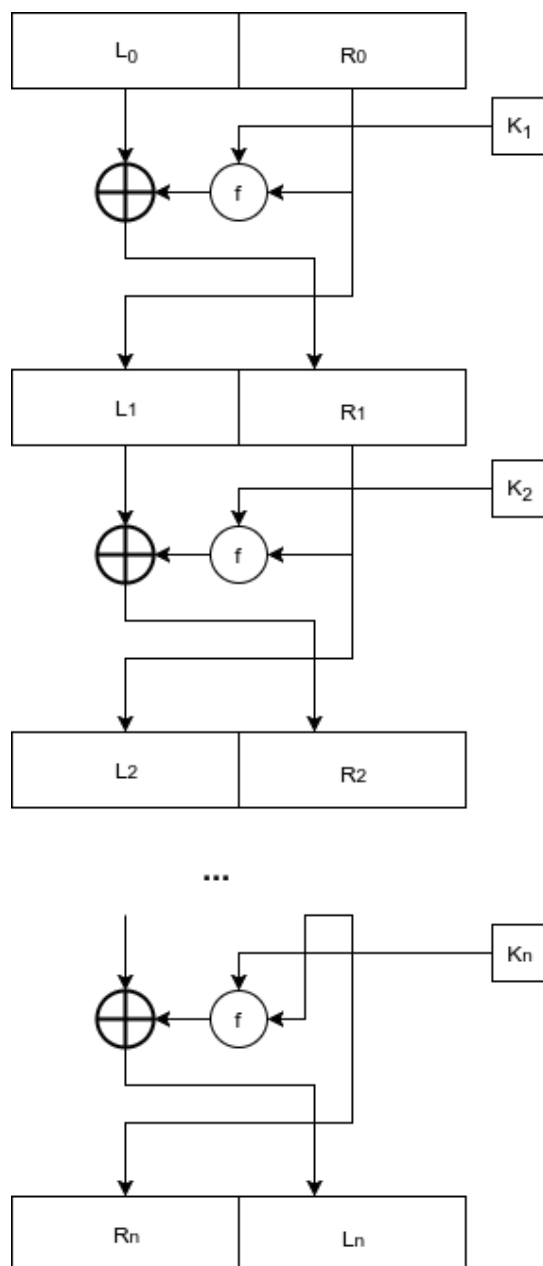


Figura 2.4: Diagrama genérico de una red Feistel.

2.2.4. Data Encryption Standard (DES)

Este es, probablemente, el cifrado simétrico por bloques más conocido; ya que en la década de los 70 estableció un precedente al ser el primer algoritmo a nivel comercial que publicó abiertamente sus especificaciones y detalles de implementación. Se encuentra definido en el estándar americano FIPS 46-2.

DES es un cifrado Feistel que procesa bloques de $n = 64$ bits y produce bloques cifrados de la misma longitud. Aunque la llave es de 64 bits, 8 son de paridad, por lo que el tamaño *efectivo* de la llave es de 56 bits. Las 2^{56} llaves implementan, máximo, 2^{56} de las $2^{64}!$ posibles biyecciones en bloques de 64 bits.

Con la llave K se generan 16 subllaves K_i de 48 bits; una para cada ronda. En cada ronda se utilizan 8 *cajas-s* (mapeos de sustitución de 6 a 4 bits). La entrada de 64 bits es dividida por la mitad en L_0 y R_0 . Cada ronda i va tomando las entradas L_{i-1} y R_{i-1} de la ronda anterior y produce salidas de 32 bits L_i y R_i mientras $1 \leq i \leq 16$ de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} L_i &= R_{i-1} \\ R_i &= L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, K_i) \\ \text{donde } f(R_{i-1}, K_i) &= P(S(E(R_{i-1}) \oplus K_i)) \end{aligned} \quad (2.4)$$

E se encarga de expandir R_{i-1} de 32 bits a 48, P es una permutación de 32 bits y S son las cajas-s.

```

entrada:   64 bits de texto en claro  $M = m_1 \dots m_{64}$ ;
             llave de 64 bits  $K = k_1 \dots k_{64}$ .
salida:   bloque de texto cifrado de 64 bits  $C = c_1 \dots c_{64}$ .
inicio
  Calcular 16 subllaves  $K_i$  de 48 bits partiendo de  $K$ .
  Obtener  $(L_0, R_0)$  de la tabla de permutaciones iniciales  $IP(m_1 m_2 \dots m_{64})$ 
para_todo  $i$  desde 1 hasta 16:
     $L_i = R_{i-1}$ 
    Obtener  $f(R_{i-1}, K_i)$ :
      a) Expandir  $R_{i-1} = r_1 r_2 \dots r_{32}$  de 32 a 48 bits
         usando  $E$ :  $T \leftarrow E(R_{i-1})$ .
      b)  $T' \leftarrow T \oplus K_i$ . Donde  $T'$  es representado
         como ocho cadenas de 6 bits cada una  $(B_1, \dots, B_8)$ .
      c)  $T'' \leftarrow (S_1(B_1), S_2(B_2), \dots, S_8(B_8))$ 
      d)  $T''' \leftarrow P(T'')$ 
     $R_i = L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, K_i)$ 
  fin
   $b_1 b_2 \dots b_{64} \leftarrow (R_{16}, L_{16})$ .
   $C \leftarrow IP^{-1}(b_1 b_2 \dots b_{64})$ 
fin

```

Pseudocódigo 2.3: DES, cifrado.

El descifrado DES consiste en el mismo algoritmo de cifrado, con la misma llave K , pero utilizando las subllaves en orden inverso: $K_{16}, K_{15}, \dots, K_1$.

Llaves débiles

Tomando en cuenta las siguientes definiciones

- Llave débil: una llave K tal que $E_K(E_K(M)) = M$ para toda x ; en otras palabras, una llave débil permite que, al cifrar dos veces con la misma llave, se obtenga de nuevo el mensaje en claro.
- Llaves semidébiles: se tiene un par de llaves K_1, K_2 tal que $E_{K_1}(E_{K_2}(x)) = x$.

DES tiene cuatro llaves débiles y seis pares de llaves semidébiles. Las cuatro llaves débiles generan subllaves K_i iguales y, debido a que DES es un cifrado Feistel, el cifrado es autorreversible. O sea que al final se obtiene de nuevo el texto en claro, pues cifrar dos veces con la misma llave regresa la entrada original. Respecto a los pares semidébiles, el cifrado con una de las llaves del par es equivalente al descifrado con la otra (o viceversa).

2.2.5. Advanced Encryption Standard (AES)

Dado que el tamaño de bloque y la longitud de la llave de DES se volvieron muy pequeños para resistir los embates del progreso de la tecnología, el NIST comenzó la búsqueda de un nuevo cifrado estándar en 1997; este cifrado debía tener un tamaño de bloque de, al menos, 128 bits y soportar tres tamaños de llave: 128, 192 y 256 bits.

Después de pasar por un proceso de selección, la propuesta Rijndael fue seleccionada. Se le hicieron algunas modificaciones, pues Rijndael soporta combinaciones de llaves y bloques de longitud 128, 169, 192, 224 y 256; mientras que AES tiene fijo el tamaño de bloque y solo utiliza los tres tamaños de llave mencionados anteriormente. Dependiendo del tamaño de la llave, se tiene el número de rondas: 10 para las de 128 bits, 12 para las de 192 y 14 para las de 256.

El cifrado requiere de una matriz de 4×4 denominada matriz de estado.

entrada: 128 bits de texto en claro M ; llave de n bits K .

salida: bloque de texto cifrado de 64 bits $C = c_1 \dots c_{64}$.

inicio

Obtener las subllaves de 128 bits necesarias: una para cada ronda y una extra.

Iniciar matriz de estado con el bloque en claro.

Realizar $AddRoundKey(matriz_estado, k_0)$

para_todo i desde 1 hasta $num_rondas - 1$:

$SubBytes(matriz_estado)$

```

    ShiftRows(matriz_estado)
    MixColumns(matriz_estado)
    AddRoundKey(matriz_estado, ki)
fin
SubBytes(matriz_estado)
ShiftRows(matriz_estado)
MixColumns(matriz_estado)
AddRoundKey(matriz_estado, knum_rondas)
regresa matriz_estado
fin
    
```

Pseudocódigo 2.4: AES, cifrado.

Como todos los pasos realizados en las rondas son invertibles, el proceso de descifrado consiste en aplicar las funciones inversas a *SubBytes*, *ShiftRows*, *MixColumns* y *AddRoundKey* en el orden opuesto. Tanto el algoritmo como sus pasos están pensados con bytes. En el algoritmo Rijndael los bytes son considerados como elementos del campo finito \mathbb{F}_{2^8} con 2^8 elementos; \mathbb{F}_{2^8} es construido como una extensión del campo \mathbb{F}_2 con 2 elementos mediante el uso del polinomio irreducible $X^8 + X^4 + X^3 + X + 1$. Por lo tanto, las operaciones que se hagan a continuación de adición y el producto entre bytes significa sumarlos y multiplicarlos como elementos del campo \mathbb{F}_{2^8} .

SubBytes

Esta es la única transformación no lineal de Rijndael. Sustituye los bytes de la matriz de estado byte a byte al aplicar la función S_{RD} a cada elemento de la matriz. La función S_{RD} es también conocida como Caja-S y no depende de la llave. La misma caja es utilizada para los bytes en todas las posiciones.


 Figura 2.5: Diagrama de la operación *SubBytes*.

ShiftRows

Esta transformación hace un corrimiento cíclico hacia la izquierda de las filas de la matriz de estado. Los desplazamientos son distintos para cada fila y dependen de la longitud del bloque (N_b).

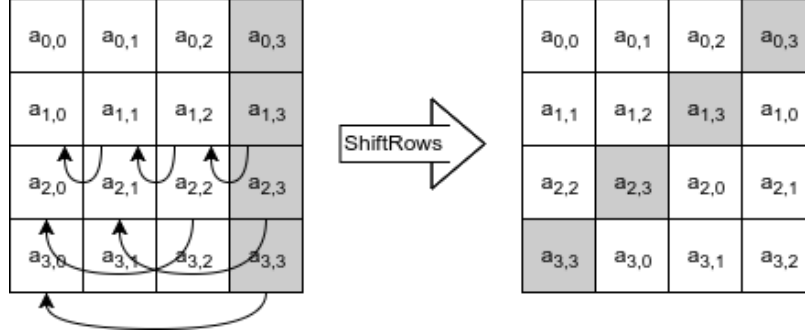


Figura 2.6: Diagrama de la operación *ShiftRows*.

MixColumns

Esta transformación opera en cada columna de la matriz de estado independientemente. Se considera una columna $a = (a_0, a_1, a_2, a_3)$ como el polinomio $a(X) = a_3X^3 + a_2X^2 + a_1X + a_0$. Entonces este paso transforma una columna a al multiplicarla con el siguiente polinomio fijo:

$$c(X) = 03X^3 + 01X^2 + 01X + 02 \quad (2.5)$$

y se toma el residuo del producto módulo $X^4 + 1$:

$$a(X) \mapsto a(X) \cdot c(X) \pmod{X^4 + 1} \quad (2.6)$$



Figura 2.7: Diagrama de la operación *MixColumns*.

AddRoundKey

Esta es la única operación que depende de la llave secreta k . Añade una llave de ronda para intervenir en el resultado de la matriz de estado. Las llaves de ronda son derivadas de la llave secreta k al aplicar el algoritmo de generación de llaves. Las llaves de ronda tienen la misma longitud que los bloques. Esta operación es simplemente una operación XOR bit a bit de la matriz de estado con la llave de ronda en turno. Para obtener el nuevo valor de la matriz de estado se realiza lo siguiente:

$$(matriz_estado, k_i) \mapsto matriz_estado \oplus k_i \quad (2.7)$$

Como se tiene una *matriz_estado*, la llave de ronda (k_i) también es representada como una matriz de bytes con 4 columnas y N_b columnas. Cada una de las N_b palabras de la llave de ronda corresponde a una columna. Entonces se realiza la operación XOR bit a bit sobre las entradas correspondientes de la matriz de estado y la matriz de la llave de ronda.

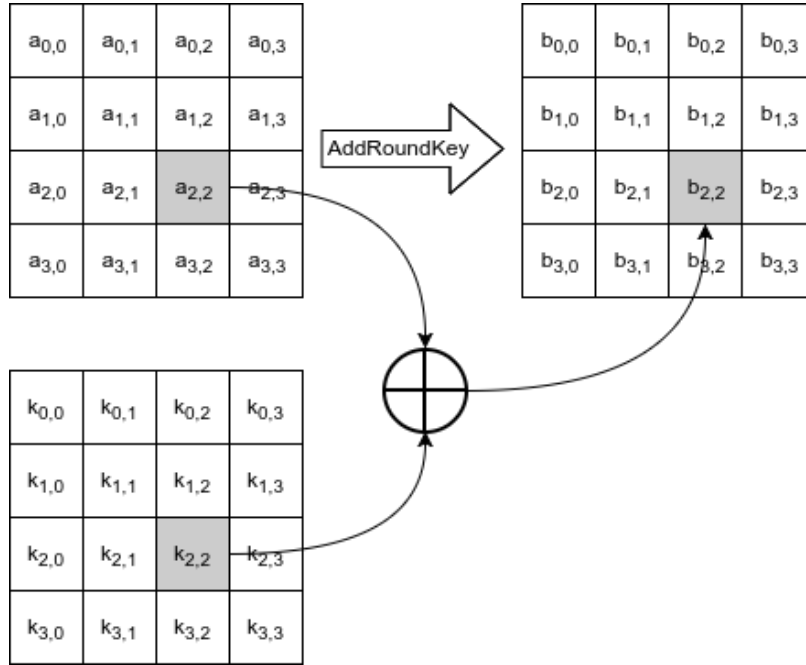


Figura 2.8: Diagrama de la operación *AddRoundKey*.

Esta operación, claro está, es invertible: basta con aplicar la misma operación con la misma llave para revertir el efecto.

2.2.6. Fast Data Encipherment Algorithm (FEAL)

Es una familia de algoritmos que ha tenido una participación crítica en el desarrollo y refinamiento de varias técnicas del criptoanálisis, tales como el criptoanálisis lineal y diferencial. FEAL-N mapea bloques de texto en claro de 64 bits a bloques de 64 bits de texto cifrado mediante una llave secreta de 64 bits. Es un cifrado Feistel de n -rondas parecido a DES, pero con una función f más simple.

FEAL fue diseñado para ser veloz y simple, especialmente para microprocesadores de 8 bits: usa operaciones orientadas a bytes, evita el uso de permutaciones de bit y tablas de consulta. La versión inicial de cuatro rondas (FEAL-4), propuesto como una alternativa rápida a DES, fue encontrado mucho más inseguro de lo planeado; por lo que se propuso realizar más rondas (FEAL-16 y FEAL-32) para compensar y ofrecer un nivel de seguridad parecido a DES; sin embargo, el rendimiento se ve fuertemente afectado mientras el número de rondas aumenta; y, mientras DES puede mejorar su velocidad con tablas de consulta, resulta más complicado para FEAL.

```

entrada:    64 bits de texto en claro  $M = m_1 \dots m_{64}$ ;
              llave de 64 bits  $K = k_1 \dots k_{64}$ .
salida:    bloque de texto cifrado de 64 bits  $C = c_1 \dots c_{64}$ .
inicio
    Calcular 16 subllaves de 16 bits para  $K$ .
    Definir  $M_L = m_1 \dots m_{32}$ ;  $M_R = m_{33} \dots m_{64}$ .
     $(L_0, R_0) \leftarrow (M_L, M_R) \oplus ((K_8, K_9), (K_{10}, K_{11}))$ 
     $R_0 \leftarrow R_0 \oplus L_0$ .
    para_todo  $i$  desde 1 hasta 8:
         $L_i \leftarrow R_{i-1}$ 
         $R_i \leftarrow L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, K_{i-1})$ 
    fin
     $L_8 \leftarrow L_8 \oplus R_8$ 
     $(R_8, L_8) \leftarrow (R_8, L_8) \oplus ((K_{12}, K_{13}), (K_{14}, K_{15}))$ 
     $C \leftarrow (R_8, L_8)$ .
fin

```

Pseudocódigo 2.5: FEAL-8, cifrado.

Para descifrar se utiliza el mismo algoritmo, con la misma llave K y el texto cifrado $C = (R_8, L_8)$ se utiliza como la entrada M ; sin embargo, la generación de llaves se hace al revés: las subllaves $((K_{12}, K_{13}), (K_{14}, K_{15}))$ se utilizan para la \oplus inicial, las $((K_8, K_9), (K_{10}, K_{11}))$ para la \oplus final y en las rondas se utiliza de la subllave K_7 a la K_0 .

FEAL con una llave de 64 bits puede ser generalizado a un número n de rondas con n par, aunque se recomienda $n = 2^x$.

2.2.7. International Data Encryption Algorithm (IDEA)

Cifra bloques de 64 bits utilizando una llave de 128 bits. Este cifrado está basado en una generalización de la estructura Feistel y consiste en 8 rondas idénticas seguidas por una transformación. Cada ronda r utiliza 6 subllaves $K_i^{(r)}$ ($1 \leq i \leq 6$) de 16 bits que se encargan de transformar una entrada X de 64 bits en una salida de cuatro bloques de 16-bits, que son utilizados como entrada en la siguiente ronda. La salida de la ronda 8 tiene como entrada la transformación de salida que, al emplear cuatro llaves adicionales $K_i^{(9)}$ ($1 \leq i \leq 4$), produce los datos cifrados $Y = (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4)$.

```

entrada:    64-bits de datos en claro  $M = m_1 \dots m_{64}$ ;
              llave de 128-bits  $K = k_1 \dots k_{128}$ .
salida:    bloque cifrado de 64-bits  $Y = (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4)$ .
inicio
  Calcular las subllaves  $K_1^{(r)}, \dots, K_6^{(r)}$  para las rondas  $1 \leq r \leq 8$  y  $K_1^{(9)}, \dots, K_4^{(9)}$ 
  para la transformación de salida.
   $(X_1, X_2, X_3, X_4) \leftarrow (m_1 \dots m_{16}, m_{17} \dots m_{32}, m_{33} \dots m_{48}, m_{49} \dots m_{64})$ 
  donde  $X_i$  almacena 16 bits.
  para todo  $r$  desde 1 hasta 8:
    a)  $X_1 \leftarrow X_1 \times K_1^{(r)} \text{ mód } 2^{16} + 1$ 
        $X_4 \leftarrow X_4 \times K_4^{(r)} \text{ mód } 2^{16} + 1$ 
        $X_2 \leftarrow X_2 + K_2^{(r)} \text{ mód } 2^{16}$ 
        $X_3 \leftarrow X_3 + K_3^{(r)} \text{ mód } 2^{16}$ 
    b)  $t_0 \leftarrow K_5^{(r)} \times (X_1 \oplus X_3) \text{ mód } 2^{16} + 1$ 
        $t_1 \leftarrow K_6^{(r)} \times (t_0 + (X_2 \oplus X_4)) \text{ mód } 2^{16} + 1$ 
        $t_2 \leftarrow t_0 + t_1 \text{ mód } 2^{16}$ 
    c)  $X_1 \leftarrow X_1 \oplus t_1$ 
        $X_4 \leftarrow X_4 \oplus t_2$ 
        $a \leftarrow X_2 \oplus t_2$ 
        $X_2 \leftarrow X_3 \oplus t_1$ 
        $X_3 \leftarrow a$ 
  fin
  Realizar la transformación de salida:
   $Y_1 \leftarrow X_1 \times K_1^{(9)} \text{ mód } 2^{16} + 1$ 
   $Y_4 \leftarrow X_4 \times K_4^{(9)} \text{ mód } 2^{16} + 1$ 
   $Y_2 \leftarrow X_3 + K_2^{(9)} \text{ mód } 2^{16}$ 
   $Y_3 \leftarrow X_2 + K_3^{(9)} \text{ mód } 2^{16}$ 
fin

```

Pseudocódigo 2.6: IDEA, cifrado.

El descifrado se realiza con el mismo algoritmo de cifrado, pero utilizando como entrada los datos cifrados Y como entrada M . Se usa la misma llave K ; aunque las subllaves sufren una modificación al ser generadas, pues se utiliza una tabla y se realizan las operaciones contrarias (inverso de la adición y el inverso del producto).

Descartando los ataques a las llaves débiles, no hay un mejor ataque publicado para el IDEA de 8 rondas que el de la búsqueda exhaustiva en el espacio de llave. Por lo que la seguridad está ligada a la creciente debilidad de su tamaño de bloque relativamente pequeño.

2.2.8. Secure And Fast Encryption Routine (SAFER)

El cifrado SAFER K-64 es un cifrado por bloques de 64 bits iterativo. Consiste en r rondas idénticas seguidas por una transformación. Originalmente se recomendaban 6 rondas seguidas, sin embargo, ahora se utiliza una generación de claves ligeramente modificada y el uso de 8 rondas (máximo 10). Ambas generaciones de llaves expanden la llave de 64 bits en $2r + 1$ subllaves, cada una de 64 bits (dos por cada ronda y una más para la transformación de salida).

Este cifrado consiste completamente en operaciones de bytes, por lo que es adecuado para procesadores con tamaños de palabra pequeños, como los chips de tarjetas.

entrada: $r, 6 \leq r \leq 10$; 64-bits de datos en claro $M = m_1 \dots m_{64}$; $K = k_1 \dots k_{64}$.

salida: bloque cifrado de 64-bits $Y = (Y_1, \dots, Y_8)$.

inicio

Calcular las subllaves K_1, \dots, K_{2r+1}

$(X_1, X_2, \dots, X_8) \leftarrow (m_1 \dots m_8, m_9 \dots m_{16}, \dots, m_{57} \dots m_{64})$

para_todo i desde 1 hasta r :

a) Para $j = 1, 4, 5, 8$: $X_j \leftarrow X_j \oplus K_{2i-1}[j]$

Para $j = 2, 3, 6, 7$: $X_j \leftarrow X_j + K_{2i-1}[j] \bmod 2^8$

b) Para $j = 1, 4, 5, 8$: $X_j \leftarrow S[X_j]$

Para $j = 2, 3, 6, 7$: $X_j \leftarrow S_{inversa} X_j$

c) Para $j = 1, 4, 5, 8$: $X_j \leftarrow X_j + K_{2i}[j] \bmod 2^8$

Para $j = 2, 3, 6, 7$: $X_j \leftarrow X_j \oplus K_{2i}[j]$

d) Para $j = 1, 3, 5, 7$: $(X_j, X_{j+1}) \leftarrow f(X_j, X_{j+1})$.

e) $(Y_1, Y_2) \leftarrow f(X_1, X_3), (Y_3, Y_4) \leftarrow f(X_5, X_7)$,

$(Y_5, Y_6) \leftarrow f(X_2, X_4), (Y_7, Y_8) \leftarrow f(X_6, X_8)$.

Para j desde 1 hasta 8: $X_j \leftarrow Y_j$

f) $(Y_1, Y_2) \leftarrow f(X_1, X_3), (Y_3, Y_4) \leftarrow f(X_5, X_7)$,

$(Y_5, Y_6) \leftarrow f(X_2, X_4), (Y_7, Y_8) \leftarrow f(X_6, X_8)$.

Para j desde 1 hasta 8: $X_j \leftarrow Y_j$.

fin

Para $j = 1, 4, 5, 8$: $Y_j \leftarrow X_j \oplus K_{2r+1}[j]$.

Para $j = 2, 3, 6, 7$: $Y_j \leftarrow X_j + K_{2r+1}[j] \bmod 2^8$.

fin

Pseudocódigo 2.7: SAFER K-64, cifrado.

Para descifrar, se utiliza la misma llave K y las subllaves K_i que fueron utilizadas al cifrar. Cada paso del cifrado se hace en orden inverso, del último al primero; comenzando con una transformación de entrada utilizando la llave K_{2r+1} para deshacer la transformación de salida, se sigue con las rondas de descifrado

utilizando las llaves de K_{2r} a K_1 , invirtiendo los pasos cada ronda.

2.2.9. RC5

Este cifrado por bloques tiene una arquitectura orientada a palabras (ya sea $w = 16, 32, 64$ bits) y tiene una descripción muy compacta adecuada tanto para hardware como para software. Tanto la longitud b de la llave y el número de rondas r es variable; aunque se recomiendan 12 rondas para 32 bits y 16 para cuando se tienen palabras de 64.

```

entrada:   $2w$ -bits de datos en claro  $M = (A, B)$ ;  $r$ ;
           llave  $K = K[0] \dots K[b-1]$ 
salida:   $2w$ -bits de datos cifrados  $C$ .
inicio
  Calcular  $2r+2$  subllaves  $K_0, \dots, K_{2r+1}$ 
   $A \leftarrow A + K_0 \text{ mód } 2^w, B \leftarrow B + K_1 \text{ mód } 2^w$ 
  para_todo  $i$  desde 1 hasta  $r$ :
     $A \leftarrow ((A \oplus B) \leftarrow B) + K_{2i} \text{ mód } 2^w$ 
     $B \leftarrow ((B \oplus A) \leftarrow A) + K_{2i+1} \text{ mód } 2^w$ 
  fin
  Regresar  $C \leftarrow (A, B)$ 
fin

```

Pseudocódigo 2.8: RC5, cifrado.

Para descifrar, RC5 utiliza el siguiente algoritmo.

```

entrada:   $2w$ -bits de datos cifrados  $C = (A, B)$ ;  $r$ ;
           llave  $K = K[0] \dots K[b-1]$ 
salida:   $2w$ -bits de datos en claro  $M$ .
inicio
  Calcular  $2r+2$  subllaves  $K_0, \dots, K_{2r+1}$ 
   $A \leftarrow A + K_0 \text{ mód } 2^w, B \leftarrow B + K_1 \text{ mód } 2^w$ 
  Para  $i$  desde  $r$  hasta 1:
     $B \leftarrow ((B - K_{2i+1} \text{ mód } 2^w) \leftarrow A) \oplus A$ 
     $A \leftarrow ((A - K_{2i} \text{ mód } 2^w) \leftarrow B) \oplus B$ 
  fin
  Regresar  $M \leftarrow (A - K_0 \text{ mód } 2^w, B - K_1 \text{ mód } 2^w)$ 
fin

```

Pseudocódigo 2.9: RC5, descifrado.

2.2.10. Modos de operación

La información que aquí se presenta se puede consultar a mayor detalle en [3] y [1].

Por sí solos, los cifrados por bloques solamente permiten el cifrado y descifrado de bloques de información de tamaño fijo; donde, en la mayoría de los casos, los bloques son de menos de 256 bits, lo cual es equivalente a alrededor de 8 caracteres. Es fácil darse cuenta de que esta restricción no es ningún tema menor: en la gran mayoría de las aplicaciones, la longitud de lo que se quiere ocultar es arbitraria.

Los modos de operación permiten extender la funcionalidad de los cifrados por bloques para poder aplicarlos a información de tamaño irrestricto: reciben el texto original (de tamaño arbitrario) y lo cifran, ocupando en el proceso un cifrado por bloques.

Un primer enfoque (y quizás el más intuitivo) es partir el mensaje original en bloques del tamaño requerido y después aplicar el algoritmo a cada bloque por separado; en caso de que la longitud del mensaje no sea múltiplo del tamaño de bloque, se puede agregar información extra al último bloque para completar el tamaño requerido. Este es, de hecho, el primero de los modos que se presentan a continuación, el *Electronic Codebook* (ECB); su uso no es recomendado, pues es muy inseguro cuando el mensaje original es simétrico a nivel de bloque. También se enlistan otros tres modos, los cuales junto con ECB, son los más comunes.

***Electronic Codebook* (ECB)**

La figura 2.9 muestra un diagrama esquemático de este modo de operación. El algoritmo recibe a la entrada una llave y un mensaje de longitud arbitraria: la llave se pasa sin ninguna modificación a cada función del cifrado por bloques; el mensaje se debe de partir en bloques ($M = Bm_1 || Bm_2 || \dots || Bm_n$).

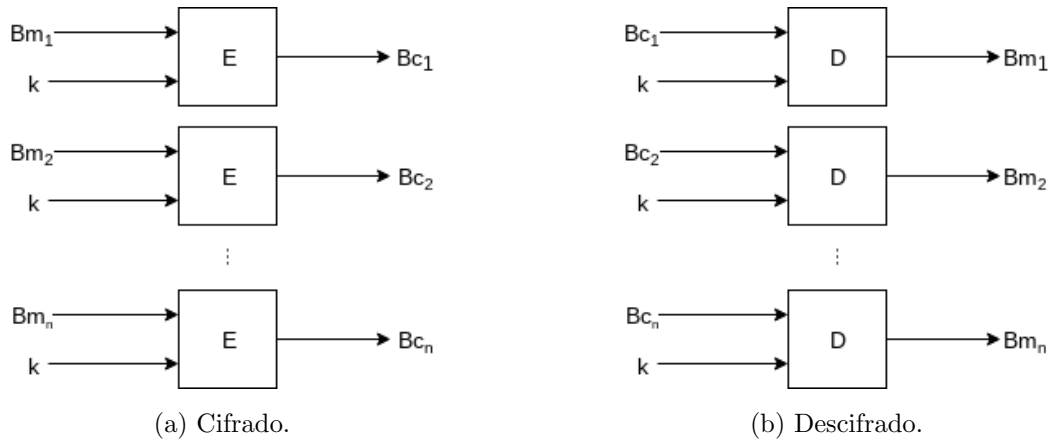


Figura 2.9: Modo de operación ECB.

entrada: llave k ; bloques de mensaje $Bm_1, Bm_2 \dots Bm_n$.

salida: bloques de mensaje cifrado $Bc_1, Bc_2 \dots Bc_n$.

inicio

para_todo Bm

$Bc_i \leftarrow E_k(Bm_i)$

```

fin
regresar Bc
fin

```

Pseudocódigo 2.10: Modo de operación ECB, cifrado.

```

entrada: llave  $k$ ; bloques de mensaje cifrado  $Bc_1, Bc_2 \dots Bc_n$ .
salida: bloques de mensaje original  $B_1, B_2 \dots B_n$ .
inicio
  para_todo  $Bc$ 
     $Bm_i \leftarrow D_k(Bc_i)$ 
  fin
  regresar  $Bm$ 
fin

```

Pseudocódigo 2.11: Modo de operación ECB, descifrado.

Cipher-block Chaining (CBC)

En CBC la salida del bloque cifrador uno se introduce (junto con el siguiente bloque del mensaje) en el bloque cifrador dos, y así en sucesivo. Para poder replicar este comportamiento en todos los bloques cifradores, este modo de operación necesita un argumento extra a la entrada: un vector de inicialización. De esta manera la salida del bloque i depende de todos los bloques anteriores; esto incrementa la seguridad con respecto a ECB.

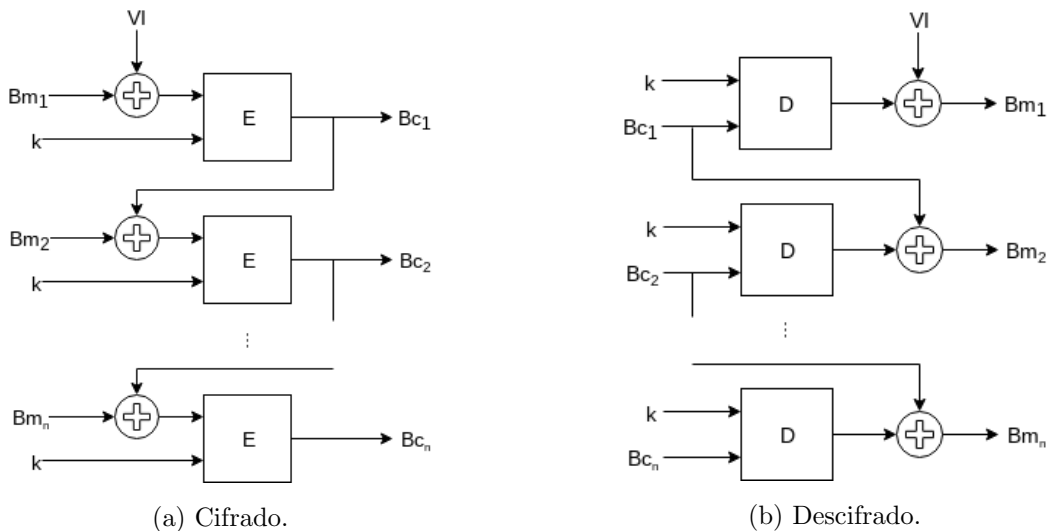


Figura 2.10: Modo de operación CBC.

En la figura 2.10 se muestran los diagramas esquemáticos para cifrar y descifrar; en los pseudocódigos

2.12 y 2.13 se muestran unos de los posibles algoritmos a seguir. Es importante notar que mientras que el proceso de cifrado debe ser forzosamente secuencial (por la dependencias entre salidas), el proceso de descifrado puede ser ejecutado en paralelo.

```

entrada: llave  $k$ ; vector de inicialización  $VI$ ;
           bloques de mensaje  $Bm_1, Bm_2 \dots Bm_n$ .
salida:  bloques de mensaje cifrado  $Bc_1, Bc_2 \dots Bc_n$ .
inicio
   $Bc_0 \leftarrow VI$  // El vector de inicialización
  para_todo  $Bm$  // entra al primer bloque.
     $Bc_i \leftarrow E(k, Bm_i \oplus Bc_{i-1})$ 
  fin
  regresar  $Bc$ 
fin

```

Pseudocódigo 2.12: Modo de operación CBC, cifrado.

```

entrada: llave  $k$ ; vector de inicialización  $VI$ ;
           bloques de mensaje cifrado  $Bc_1, Bc_2 \dots Bc_n$ .
salida:  bloques de mensaje original  $Bm_1, Bm_2 \dots Bm_n$ .
inicio
   $Bc_0 \leftarrow VI$ 
  para_todo  $Bc$ 
     $Bm_i \leftarrow D_k(Bc_i) \oplus Bc_{i-1}$ 
  fin
  regresar  $Bm$ 
fin

```

Pseudocódigo 2.13: Modo de operación CBC, descifrado.

Cipher Feedback (CFB)

Al igual que la operación de cifrado de CBC, ambas operaciones de CFB (cifrado y descifrado) están encadenadas bloque a bloque, por lo que son de naturaleza secuencial. En este caso, lo que se cifra en el primer paso es el vector de inicialización; la salida de esto se opera con un **xor** sobre el primer bloque de texto en claro, para obtener el primer bloque cifrado (figura 2.11).

Esta distribución presenta varias ventajas con respecto a CBC: las operaciones de cifrado y descifrado son sumamente similares, lo que permite ser implementadas por un solo algoritmo (pseudocódigo 2.14); tanto para cifrar como para descifrar solamente se ocupa la operación de cifrado del algoritmo a bloques subyacente. Estas ventajas se deben principalmente a las propiedades de la operación **xor** (ecuación 2.8).

$$A \oplus B = C \quad \Rightarrow \quad A = B \oplus C \quad (2.8)$$

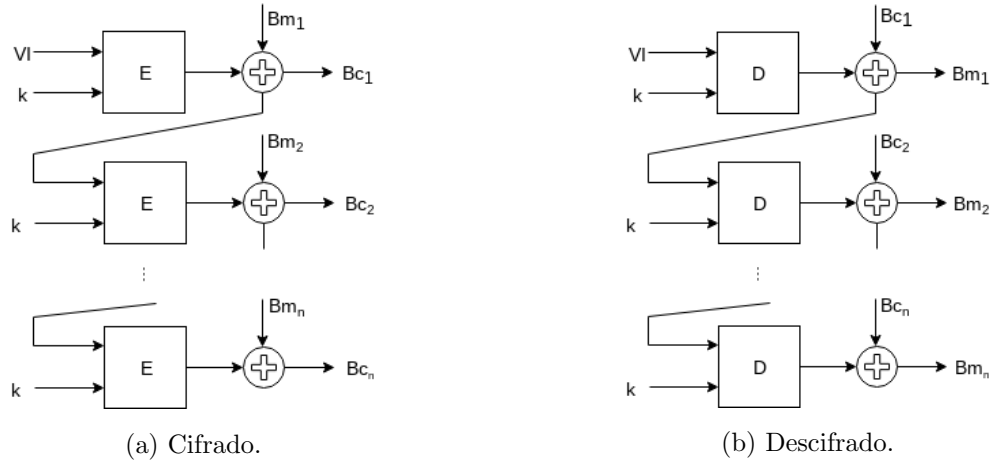


Figura 2.11: Modo de operación CFB.

entrada: llave k ; vector de inicialización VI ;
 bloques de mensaje (cifrado o descifrado) $Bm_1, Bm_2 \dots Bm_n$.
salida: bloques de mensaje (cifrado o descifrado) $Bc_1, Bc_2 \dots Bc_n$.
inicio
 $Bc_0 \leftarrow VI$
para_todo Bm
 $Bc_i \leftarrow C_k(Bc_{i-1}) \oplus Bm_i$
fin
regresar Bc
fin

Pseudocódigo 2.14: Modo de operación CFB(cifrado y descifrado).

Output Feedback (OFB)

Este modo es muy similar al anterior (CFB), salvo que la retroalimentación va directamente de la salida del cifrador a bloques. De esta forma, nada que tenga que ver con el texto en claro llega al cifrado a bloques; este solamente se la pasa cifrando una y otra vez el vector de inicialización.



Figura 2.12: Modo de operación OFB.

entrada: llave k ; vector de inicialización VI ;
 bloques de mensaje (cifrado o descifrado) $Bm_1, Bm_2 \dots Bm_n$.
salida: bloques de mensaje (cifrado o descifrado) $Bc_1, Bc_2 \dots Bc_n$.
inicio
 auxiliar $\leftarrow VI$
para_todo Bm
 auxiliar $\leftarrow E_k(\text{auxiliar})$
 $Bc_i \leftarrow \text{auxiliar} \oplus Bm_i$
fin
 regresar Bc
fin

Pseudocódigo 2.15: Modo de operación OFB(cifrado y descifrado).

2.3. Cifrados de flujo

La información de esta sección (junto con las subsecciones contenidas) puede ser encontrada con mayor detalle en [1], [4] y [5].

A diferencia de los cifrados de bloque, que trabajan sobre grupos enteros de bits a la vez, los cifrados de flujo trabajan sobre bits individuales, cifrándolos uno por uno. Una manera de verlos es como cifrados por bloques con un tamaño de bloque igual a 1.

Un cifrado de flujo aplica transformaciones de acuerdo a un flujo de llave: una secuencia de símbolos pertenecientes al espacio de llaves. El flujo de llave puede ser generado tanto de manera aleatoria, como por un algoritmo pseudoaleatorio que reciba a la entrada, o bien una semilla, o bien una semilla y algunos bits del texto cifrado.

Entre las ventajas de los cifrados de flujo sobre los cifrados de bloque se encuentra el hecho de que son más rápidos en hardware y más útiles cuando el buffer es limitado o se necesita procesar la información al momento de llegada. La propagación de los errores es limitada o nula, por lo que también son más apropiados en casos en los que hay probabilidades altas de errores en la transmisión.

Los cifrados de bloques funcionan sin ninguna clase de memoria (por sí solos); en contraste, la función de cifrado de un cifrado de flujo puede variar mientras se procesa el texto en claro, por lo cuál tienen un mecanismo de memoria asociado. Otra denominación para estos cifrados es *de estado*, por que la salida no depende solamente del texto en claro y de la llave, sino que también depende del estado actual.

2.3.1. Clasificación

Una clasificación común es en *síncronos* y en *autosincronizables*. A continuación se describen a grandes rasgos ambos modelos.

Síncronos

Un cifrado de flujo síncrono es aquel en el que el flujo de la llave es generado de manera independiente del texto en claro y del texto cifrado. Se puede definir un modelo general con las siguientes tres ecuaciones.

$$e_{i+1} = f(e_i, K) \quad (2.9)$$

$$k_i = g(e_i, K) \quad (2.10)$$

$$c_i = h(k_i, m_i) \quad (2.11)$$

La letra e representa el estado del cifrado, K es la llave, k es la salida del flujo de llave, c es el texto cifrado y m es el texto en claro. La función de la ecuación 2.9 (f) es la que describe el cambio de estado; este se determina a partir del estado actual y de la llave. En la ecuación 2.10 se describe la acción del flujo de llave (g): para determinar el próximo símbolo se emplea solamente el estado actual y la llave. La tercera ecuación (2.11, h) describe la acción de combinar el flujo de la llave con el mensaje, y así obtener el texto cifrado.

En la figura 2.13 se describe de manera gráfica las operaciones de cifrado y descifrado; estas guardan muchas similitudes con el modo de operación OFB (sección 2.2.10), con la única excepción de que este trabaja con bloques del tamaño del cifrado subyacente. En otras palabras, si se definiera el tamaño del bloque (y en consecuencia el tamaño del vector de inicialización) como 1, entonces OFB sería un cifrado de flujo síncrono.



Figura 2.13: Esquema general de un cifrado de flujo síncrono.

El nombre de esta categoría proviene del hecho de que ambos entes del proceso comunicativo (emisor y receptor) deben encontrarse sincronizados (usar la misma llave y encontrarse en la misma posición) para que la comunicación tenga éxito: si se insertan dígitos extras al mensaje cifrado, la sincronización se pierde. Los cifrados de flujo síncronos no tienen propagación de error: aunque ciertos bits sean modificados (pero no borrados) durante su transmisión, el resto del mensaje sigue siendo descifráble.

Autosincronizables

En esta clasificación se engloban a aquellos cifrados cuyo flujo de llave es resultado de la propia llave original y de cierto número previo de dígitos cifrados. Las ecuaciones que describen su comportamiento son las siguientes.

$$e_{i+1} = (c_{i-t}, c_{i-t+1}, \dots, c_{i-1}) \quad (2.12)$$

$$k_i = g(e_i, K) \quad (2.13)$$

$$c_i = h(k_i, m_i) \quad (2.14)$$

La notación es la misma que en las ecuaciones 2.9, 2.10 y 2.11. En este caso, el próximo estado depende de t (el tamaño de la ventana) dígitos cifrados anteriormente. En la figura 2.14 se describe de manera gráfica el proceso de cifrado y descifrado.

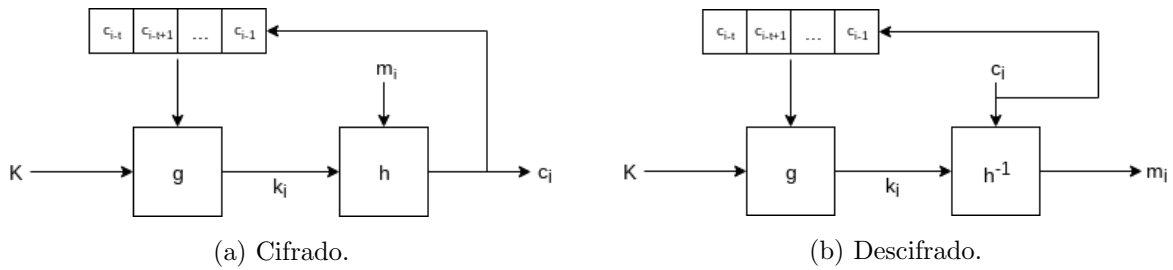


Figura 2.14: Esquema general de un cifrado de flujo autosincronizable.

En una antítesis de la categoría anterior, el nombre de esta indica que no es necesario que el emisor y el receptor estén sincronizados: si se llegan a perder bits en la transmisión, el esquema es capaz de autosincronizarse, pues el flujo de la llave depende de cierto número de bits anteriores. A esta categoría también se le conoce como «asíncrona».

La propagación de los errores depende del tamaño de ventana (el número t de bits previos utilizados para calcular la próxima llave), si se modifica un bit, entonces los próximos t serán incorrectos.

2.3.2. RC4

RC4 es un cifrado de flujo diseñado por Ron L. Rivest en 1987 para la empresa RSA. Es usado en varios protocolos de seguridad comunes: *Secure Sockets Layer* (SSL)/*Transport Layer Security* (TLS), *Wired Equivalent Privacy* (WEP) y *WiFi Protected Access* (WPA); los dos últimos son parte del estándar IEEE 802.11 para comunicaciones LAN inalámbricas. RC4 se mantenía como secreto de compañía hasta que, en septiembre de 1994, fue filtrado de forma anónima en Internet.

En el pseudocódigo 2.16 se describe el proceso de cifrado del algoritmo. S es un vector de estado; T es un vector temporal.

```

entrada: llave  $k$ ; mensaje original  $m_1, m_2 \dots m_n$ .
salida: mensaje cifrado  $c_1, c_2 \dots c_n$ .
inicio
  /* Inicialización */
  para_todo  $i$  entre 0 y 255:
     $S[i] \leftarrow i$ 
     $T[i] \leftarrow K[i \bmod \text{longitud\_de\_llave}]$ 
  fin

  /* Permutación inicial */
   $j \leftarrow 0$ 
  para_todo  $i$  entre 0 y 255:
     $j = (j + S[i] + T[i]) \bmod 256$ 
    intercambiar( $S[i]$ ,  $S[j]$ )
  fin

  /* Proceso de cifrado */
   $i, j \leftarrow 0$ 
  para_todo  $m$ :
     $i \leftarrow (i + 1) \bmod 256$ 
     $j \leftarrow (j + S[i]) \bmod 256$ 
    intercambiar( $S[i]$ ,  $S[j]$ )
     $k \leftarrow S[(S[i] + S[j]) \bmod 256]$ 
     $c \leftarrow m \oplus k$ 
  fin
regresar  $c$ 
fin

```

Pseudocódigo 2.16: Proceso de cifrado de RC4.

Se han hecho varias publicaciones que analizan métodos para atacar RC4, ninguna de las cuales presenta algo práctico cuando se utiliza una llave mayor a 128 bits. Sin embargo, en [6] se reporta un problema más serio sobre la implementación que se hace de RC4 en el protocolo WEP; este problema en particular no ha demostrado afectar a otras aplicaciones que usan RC4.

2.3.3. El proyecto eSTREAM

La información aquí expuesta puede ser consultada a mayor detalle en [7], [8] y [9].

El proyecto eSTREAM fue un esfuerzo de la comunidad ECRYPT para promover el diseño de cifrados de flujo eficientes y compactos. Como resultado, se publicó un portafolio en abril de 2008, el cual ha estado bajo continuas actualizaciones desde entonces; actualmente cuenta con siete algoritmos (tabla 2.1).

Perfil 1	Perfil 2
HC-128	Grain v1
Rabbit	MICKEY v2
Salsa20/12	Trivium
Sosemanuk	

Tabla 2.1: Finalistas del proyecto eSTREAM

El portafolio se divide en dos perfiles: el primero contiene algoritmos adecuados para aplicaciones de software con requerimientos de rapidez de procesamiento muy altos; el segundo se enfoca en aplicaciones de hardware con pocos recursos disponibles.

El proyecto se inició después de que Adi Shamir se preguntara si realmente había necesidad de los cifrados de flujo, en una conferencia de RSA en 2004. El principal argumento a favor fue que, para la gran mayoría de los casos, el uso de AES (sección 2.2.5) con una configuración de flujo es una solución adecuada. Este último punto de vista iba generalmente acompañado de la creencia de que era imposible diseñar cifrados de flujo seguros (un proyecto anterior similar, NESSIE, terminó sin resultados después de todos los criptoanálisis hechos). Por otra parte, como argumentos en contra, Shamir identificó dos áreas en las que los cifrados de flujo ofrecen ventajas respecto a los cifrados por bloques:

1. Cuando se requieren tiempos de procesamiento excepcionalmente rápidos (perfil 1).
2. Cuando los recursos disponibles son muy pocos (perfil 2).

Las palabras de Shamir fueron ampliamente difundidas, y más tarde en ese mismo año, ECRYPT lanzó el proyecto eSTREAM, cuyo principal objetivo fue ampliar el conocimiento sobre el análisis y el diseño de cifrados de flujo. Después de un periodo de estudio, se lanzó una convocatoria que generó un interés considerable: antes del 29 de abril de 2005 (la fecha límite) se recibieron 34 propuestas; algunas de las cuales intentaban cumplir con los dos perfiles a la vez (lamentablemente no sobrevivieron mucho tiempo).

2.4. Funciones hash

La información presentada a continuación puede consultarse con más profundidad en las siguientes referencias [1], [2], [10], [11].

Se refiere al conjunto de funciones computacionalmente eficientes que mapean cadenas binarias de una longitud arbitraria a cadenas binarias de una longitud fija, llamadas valores hash.

Matemáticamente, una función hash es una función

$$\begin{aligned} h : \{0, 1\}^* &\longrightarrow \{0, 1\}^n \\ m &\longmapsto h(m) \end{aligned} \tag{2.15}$$

La longitud de n suele ser entre 128 y 512 bits. Las funciones hash h tienen las siguientes propiedades:

1. Compresión: h mapea una entrada x (cuya longitud finita es arbitraria) a una salida $h(x)$ de longitud fija n .
2. Facilidad de cómputo: dada x y h , $h(x)$ es calculada ya sea sin necesitar mucho espacio, tiempo de cómputo, o requiere pocas operaciones, etcétera.

De manera general, las funciones hash se pueden dividir en dos categorías: las que no utilizan llave y su único parámetro es la entrada x , y las que necesitan una llave secreta k y la entrada x .

Sea una función hash sin llave h con entradas x , x' y salidas y y y' , respectivamente. A continuación se listan algunas de las propiedades que puede tener:

1. Resistencia de preimagen: no es computacionalmente factible para una salida específica y encontrar una entrada x' que dé como resultado el mismo valor hash $h(x') = y$ si no se conoce x . Esta propiedad también es llamada *de un sentido*.
2. Resistencia de segunda preimagen: no es computacionalmente factible encontrar una segunda entrada x' que tenga la misma salida que una entrada específica x : $x \neq x'$ tal que $h(x) = h(x')$. Esta propiedad también es conocida como *de débil resistencia a colisiones*.
3. Resistencia a las colisiones: no es computacionalmente factible encontrar dos entradas distintas x , x' que lleven al mismo valor hash, o sea, $h(x) = h(x')$. A diferencia de la anterior, la selección de ambas entradas no está restringida. Esta propiedad también es conocida como *de gran resistencia a colisiones*.

Una función hash h que cumple con las propiedades de resistencia de preimagen y resistencia de segunda preimagen es conocida como una función hash de un solo sentido o *One-Way Hash Function* (OWHF).

Las que cumplen con la resistencia de segunda preimagen y resistencia a las colisiones son conocidas como funciones hash resistentes a colisiones o *Collision-Resistant Hash Function* (CRHF). Aunque casi siempre las funciones CRHF cumplen con la resistencia de preimagen, no es obligatorio que lo hagan.

Algunos ejemplos de las funciones OWHF son el SHA-1 y el MD5. En los esquemas de firma electrónica, se obtiene el valor hash del mensaje ($h(m)$) y se pone en el lugar de la firma. Los valores hash también son utilizados para revisar la integridad de las llaves públicas y, al utilizarse con una llave secreta, las funciones criptográficas hash se convierten en códigos de autenticación de mensaje (MAC, por sus siglas en inglés), una de las herramientas más utilizadas en protocolos como SSL e IPsec para revisar la integridad de un mensaje y autenticar al remitente.

Una de las aplicaciones más conocidas de las funciones hash es la de cifrar las contraseñas: en un sistema, en vez de almacenar la contraseña *clave*, se guarda su valor hash $h(clave)$. Así, cuando un usuario ingresa su contraseña, el sistema calcula su valor hash y lo compara con el que se tiene guardado. Realizar esto ayuda a evitar que las contraseñas sean conocidas para los usuarios con privilegios, como pueden ser los administradores.

2.4.1. Integridad de datos

Las funciones criptográficas hash también son conocidas como funciones *procesadoras de mensajes* y el valor hash $h(m)$ de un mensaje m dado es llamado *huella* de m ; ya que es una representación compacta de m y, dada la resistencia a la segunda preimagen, la huella es prácticamente única. Si el mensaje fuese modificado, el valor hash sería distinto; por lo que si se tienen almacenados los valores hash, basta con calcular su valor $h(m)$ y compararlo con el que se tiene guardado para detectar modificaciones. Por esta razón, las funciones hash también son llamadas códigos de detección de modificaciones (como el MDC-2).

2.4.2. Firmas

Sea (n, e) la llave pública RSA y d el exponente decodificador secreto de Alice. En el esquema básico de firma RSA, Alice puede firmar mensajes que estén codificados por números $m \in \{0, \dots, n-1\}$. Para firmar m , aplica el algoritmo de descifrado y obtiene la firma $\sigma = m^d \bmod n$ de m . Normalmente, n es un número de 1024 bits y Alice puede firmar una cadena de bits m tal que, cuando es interpretada como número, sea menor que n . Esto es una cadena de, máximo, 128 caracteres ASCII: la mayoría de los documentos que se desean firmar suelen ser mucho más grandes. Este problema existe en todos los esquemas de firma digital y usualmente es resuelto al aplicar una función hash resistente a colisiones h . De esta forma, primero se obtiene el valor hash del mensaje $h(m)$ y esto es lo que se firma en lugar del mensaje mismo (m):

$$\sigma = h(m)^d \bmod n \quad (2.16)$$

Los mensajes que tengan el mismo valor hash tienen la misma firma. En este caso, es primordial que la función hash h sea resistente a colisiones para garantizar el no repudio. De otra manera, Alice podría firmar el mensaje m y después decir que había firmado un mensaje distinto (n). La resistencia a segundas preimágenes previene que un atacante Eve tome un mensaje m firmado por Alice, genere un mensaje nuevo n y utilice σ como una firma válida de Alice para n .

2.4.3. Message Digest-4 (MD4)

En la década de 1990 esta función hash fue diseñada por Ronald Rivest. Tiene entradas de longitud arbitraria y la longitud de la salida procesada es de 128 bits. El MD4 fue innovador y clave en el diseño para los algoritmos venideros de esta clase (como el MD5).

2.4.4. RIPEMD

Esta función hash, publicada en 1996, está basada en MD4 y fue diseñada por Hans Dobbertin y otros. Consiste en dos formas equivalentes de la función de compresión de MD4. El algoritmo original (RIPEMD-160) devuelve bloques *procesados* de 160 bits; cuando en 1996 Hans descubrió una colisión en dos rondas, se desarrollaron nuevas versiones mejoradas: RIPEMD-128, RIPE-256, RIPE-320; las cuales dan bloques procesados de 128, 256 y 320 bits respectivamente.

2.4.5. Secure Hash Algorithm (SHA)

El algoritmo SHA fue publicado por NIST y NSA en 1993; este algoritmo produce bloques de 160 bits y fue desarrollado para reemplazar al MD4; sin embargo, poco después de haber sido publicado tuvo que ser quitado por problemas de seguridad. Actualmente, SHA es conocido como SHA-0.

En 1995, SHA-0 fue reemplazado por SHA-1; tiene una salida de la misma longitud que su predecesor y es una de las funciones hash más populares. Hay que destacar que la seguridad que brinda esta función es limitada, pues tiene el mismo nivel que un cifrado por bloques de 80 bits.

En 2002 NIST publicó tres funciones hash más: SHA-256, SHA-384 y SHA-512; esta familia de funciones hash es conocida como SHA-2 y fue desarrollada para cubrir la necesidad de una llave más grande para poder empatar su tamaño con AES. Dos años más tarde, una nueva función hash fue agregada a la familia SHA-2: SHA-224.

Finalmente, en 2008, NIST inició un concurso para buscar al SHA-3 y en 2012 anunció al ganador: Keccak, una función hash desarrollada por Guido Bertoni, Joan Daemen, Michael Peeters y Gilles Van Assche. Esta función tiene una construcción completamente distinta a las familias anteriores.

2.5. Códigos de Autenticación de Mensaje (MAC)

La información presentada a continuación puede consultarse con más profundidad en las siguientes referencias [1], [2], [12]

Las funciones hash con llave cuyo propósito específico es la autenticación de origen y garantizar la integridad de datos del mensaje son llamadas *Message Authentication Code*. Estas funciones tienen como entrada una llave secreta k y un mensaje de longitud arbitraria y dan como resultado un mensaje de longitud n .

$$h_k : \{0, 1\}^* \longrightarrow \{0, 1\}^n \quad (2.17)$$

Las funciones MAC son la técnica simétrica estándar utilizada tanto para la autenticación como para la protección de la integridad de los mensajes. Dependen de unas llaves secretas que son compartidas entre las partes que se van a comunicar; cada una de las partes puede producir el MAC correspondiente para un mensaje dado. Como se explica a continuación, los MAC pueden ser obtenidos mediante cifradores de bloque, cifradores de flujo o de funciones hash criptográficas.

El algoritmo MAC más usado basado en un cifrador de bloque utiliza el modo de operación CBC (véase sección 2.2.10). Cuando DES es utilizado como el cifrado de bloque E , el tamaño de bloque es de 64 bits y la llave MAC es de 56 bits.

Otra manera de construir MAC es mediante un algoritmo de MDC que incluya una llave secreta k como parte de la entrada. Un ejemplo de esto es el algoritmo MD5-MAC; donde la función de compresión depende de la llave secreta k , que interviene en todas las iteraciones.

El algoritmo MAA fue diseñado en 1938 específicamente para obtener MAC en máquinas de 32 bits. El tiempo de ejecución es directamente proporcional a la longitud del mensaje y alrededor de cuatro veces más largo que el MD4

Bibliografía

- [1] Alfred Menezes, Paul C. van Oorschot y Scott A. Vanstone. *Handbook of Applied Cryptography*. CRC Press, 1996. ISBN: 0-8493-8523-7.
- [2] Hans Delfs y Helmut Knebl. *Introduction to Cryptography - Principles and Applications*. Information Security and Cryptography. Springer, 2007. ISBN: 978-3-540-49243-6. DOI: 10.1007/3-540-49244-5. URL: <https://doi.org/10.1007/3-540-49244-5>.
- [3] Debrup Chakraborty y Francisco Rodríguez-Henríquez. “Block Cipher Modes of Operation from a Hardware Implementation Perspective”. En: *Cryptographic Engineering*. Ed. por Çetin Kaya Koç. Springer, 2009, págs. 321-363. ISBN: 978-0-387-71816-3. DOI: 10.1007/978-0-387-71817-0_12. URL: https://doi.org/10.1007/978-0-387-71817-0_12.
- [4] William Stallings. *Cryptography and network security - principles and practice (6. ed.)* Pearson, 2014. ISBN: 978-0-13-335469-0.
- [5] Alan G. Konheim. *Computer Security and Cryptography*. Wiley, 2007. ISBN: 978-0-471-94783-7.
- [6] Scott R. Fluhrer, Itsik Mantin y Adi Shamir. “Weaknesses in the Key Scheduling Algorithm of RC4”. En: *Selected Areas in Cryptography, 8th Annual International Workshop, SAC 2001 Toronto, Ontario, Canada, August 16-17, 2001, Revised Papers*. Ed. por Serge Vaudenay y Amr M. Youssef. Vol. 2259. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2001, págs. 1-24. ISBN: 3-540-43066-0. DOI: 10.1007/3-540-45537-X_1. URL: https://doi.org/10.1007/3-540-45537-X_1.
- [7] Matthew J. B. Robshaw y Olivier Billet, eds. *New Stream Cipher Designs - The eSTREAM Finalists*. Vol. 4986. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-68350-6. DOI: 10.1007/978-3-540-68351-3. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68351-3>.
- [8] Christophe De Cannière y Bart Preneel. “Trivium”. En: *New Stream Cipher Designs - The eSTREAM Finalists*. Ed. por Matthew J. B. Robshaw y Olivier Billet. Vol. 4986. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2008, págs. 244-266. ISBN: 978-3-540-68350-6. DOI: 10.1007/978-3-540-68351-3_18. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-68351-3_18.
- [9] Steve Babbage, Christophe De Cannière, Anne Canteaut y col. “The eSTREAM Portfolio (rev. 1)”. En: (2008). URL: http://www.ecrypt.eu.org/stream/portfolio_revision1.pdf.
- [10] Alaa Hussein Al-Hamami y Ghossoon M. Waleed al-Saadoo. *Handbook of research on threat detection and countermeasures in network security*. 1.^a ed. IGI Global, 2015.
- [11] Prakash C. Gupta. *Cryptography and Network Security*. PHI Learning, 2015.
- [12] Dhiren R. Patel. *Information security - Theory and Practice*. Prentice-Hall of India, 2008.

Glosario

autenticación de origen

Tipo de autenticación donde se corrobora que una entidad es la fuente original de la creación de un conjunto de datos en un tiempo específico. Por definición, la autenticación de origen incluye la integridad de datos, pues cuando se modifican los datos, se tiene una nueva fuente. 40

biyección

Dicho de las funciones que son inyectivas y suprayectivas al mismo tiempo; en otras palabras, que todos los elementos del conjunto de salida tengan una imagen distinta en el conjunto de llegada y a cada elemento del conjunto de llegada le corresponde un elemento del conjunto de salida. 18

cifrado iterativo

Cifrado de bloque que involucra la repetición secuencial de una función interna llamada función de ronda. Los parámetros incluyen en número de rondas, el tamaño de bloque y el tamaño de llave. 16

entropía

Definida para una función de probabilidad de distribución discreta, mide cuánta información en promedio es requerida para identificar muestras aleatorias de esa distribución. . 16

integridad de datos

Propiedad en la que los datos no han sido alterados sin autorización desde que fueron creados, transmitidos o almacenados por una fuente autorizada. Operaciones que insertan, eliminan, modifican o reordenan bits invalidan la integridad de los datos. La integridad de los datos incluye que los datos estén completos y, cuando los datos son divididos en bloques, cada bloque cumplir con lo mencionado anteriormente. 40

inyectiva

Una función $f : D_f \rightarrow C_f$ es inyectiva (o uno a uno) si a diferentes elementos del dominio le corresponden diferentes elementos del codominio; se cumple para dos valores cualesquiera $x_1, x_2 \in D_f$ que $x_1 \neq x_2 \implies f(x_1) \neq f(x_2)$. . 44

modo de operación

Construcción que permite extender la funcionalidad de un cifrado a bloques para operar sobre tamaños de información arbitrarios. 15, 27–31, 48, 50

preimagen

Suponga que se tiene $x \in X$ y $y \in Y$ tal que $f(x) = y$; se dice entonces que x es preimagen de y , o que y es la imagen de x bajo f . . 37, 38

ronda

Bloque compuesto por un conjunto de operaciones que es ejecutado múltiples veces. Las rondas son definidas por el algoritmo de cifrado. 16, 18–20, 23–26, 44

suprayectiva

Una función $f : D_f \rightarrow C_f$ es suprayectiva si todo elemento de su codominio C_f es imagen de por lo menos un elemento de su dominio D_f : $\forall b \in C_f \exists a \in D_f$ tal que $f(a) = b$. . 44

vector de inicialización

Cadena de bits de tamaño fijo que sirve como entrada a muchas primitivas criptográficas (e. g. algunos modos de operación). Generalmente se requiere que sea generado de forma aleatoria. 28–30, 33

Siglas y acrónimos

AES *Advanced Encryption Standard*. 13, 19, 36, 39

ASCII *American Standard Code for Information Interchange*. 38

CBC *Cipher-block Chaining*. 28, 29, 40, 48, 50

CFB *Cipher Feedback*. 29, 30, 48, 50

CRHF *Collision-Resistant Hash Function*. 38

DES *Data Encryption Standard*. 13, 18, 19, 23, 40

ECB *Electronic Codebook*. 27, 28, 48, 50

ECRYPT *European Network of Excellence in Cryptology*. 35

FEAL *Fast Data Encipherment Algorithm*. 23

FIPS *Federal Information Processing Standard*. 18

IDEA *International Data Encryption Algorithm*. 25

IEEE *Institute of Electrical and Electronic Engineers*. 34

LAN *Local Area Network*. 34

MAA *Message Authenticator Algorithm*. 40

MAC *Message Authentication Code*. 38, 40

MD4 *Message Digest 4*. 39, 40

MD5 *Message Digest 5*. 38, 39

MDC *Message Digest Cipher*. 40

MDC-2 *Modification Detection Code 2*. 38

NESSIE *New European Schemes for Signatures, Integrity and Encryption*. 36

NIST *National Institute of Standards and Technology*. 19, 39

NSA *National Security Agency*. 39

OFB *Output Feedback*. 31, 33, 48, 50

OWHF *One-Way Hash Function*. 37, 38

RSA *Ron Rivest, Adi Shamir, Leonard Adleman.* 14, 34, 36, 38, 50

SAFER *Secure And Fast Encryption Routine.* 25

SHA *Secure Hash Algorithm.* 38, 39

SSL *Secure Sockets Layer.* 34, 38

TLS *Transport Layer Security.* 34

WEP *Wired Equivalent Privacy.* 34, 35

WPA *WiFi Protected Access.* 34

Lista de figuras

2.1. Clasificación de la criptografía.	12
2.2. Canal de comunicación con criptografía simétrica.	12
2.3. Canal de comunicación con criptografía asimétrica.	13
2.4. Diagrama genérico de una red Feistel.	17
2.5. Diagrama de la operación <i>SubBytes</i>	20
2.6. Diagrama de la operación <i>ShiftRows</i>	21
2.7. Diagrama de la operación <i>MixColumns</i>	21
2.8. Diagrama de la operación <i>AddRoundKey</i>	22
2.9. Modo de operación ECB.	27
2.10. Modo de operación CBC.	28
2.11. Modo de operación CFB.	30
2.12. Modo de operación OFB.	31
2.13. Esquema general de un cifrado de flujo síncrono.	33
2.14. Esquema general de un cifrado de flujo autosincronizable.	34

Lista de tablas

1.	Simbología	5
2.1.	Finalistas del proyecto eSTREAM	36

Lista de pseudocódigos

2.1. Proceso de generación de llaves de RSA.	14
2.2. Feistel, cifrado.	16
2.3. DES, cifrado.	18
2.4. AES, cifrado.	19
2.5. FEAL-8, cifrado.	23
2.6. IDEA, cifrado.	24
2.7. SAFER K-64, cifrado.	25
2.8. RC5, cifrado.	26
2.9. RC5, descifrado.	26
2.10. Modo de operación ECB, cifrado.	27
2.11. Modo de operación ECB, descifrado.	28
2.12. Modo de operación CBC, cifrado.	29
2.13. Modo de operación CBC, descifrado.	29
2.14. Modo de operación CFB(cifrado y descifrado).	30
2.15. Modo de operación OFB(cifrado y descifrado).	31
2.16. Proceso de cifrado de RC4.	35