

Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Cómputo

Trabajo terminal

Dra. Sandra Díaz Santiago

Generación de tokens para proteger datos de tarjetas bancarias

Número 20180008

Daniel Ayala Zamorano

Laura Natalia Borbolla Palacios

Ricardo Quezada Figueroa

Enero de 2018

Contenido

1. Introducción	3
1.1. Justificación	4
1.2. Objetivos	4
2. Antecedentes	5
2.1. Introducción a la criptografía	6
2.1.1. Objetivos de la Criptografía	6
2.1.2. Criptoanálisis y Ataques	6
2.1.3. Clasificación de la criptografía	7
2.2. Cifrados por bloques	10
2.2.1. Definición	10
2.2.2. Criterios para evaluar los cifrados por bloque	11
2.2.3. Data Encryption Standard (DES)	11
Llaves débiles	12
2.2.4. Fast Data Encipherment Algorithm (FEAL)	12
2.2.5. International Data Encryption Algorithm (IDEA)	13
2.2.6. Secure And Fast Encryption Routine (SAFER)	14
2.2.7. RC5	15
2.2.8. Modos de operación	16
<i>Electronic Codebook</i> (ECB)	17
<i>Cipher-block Chaining</i> (CBC)	18
<i>Cipher Feedback</i> (CFB)	19
<i>Output Feedback</i> (OFB)	20
2.3. Cifrados de flujo	22

2.3.1. Síncronos	22
2.3.2. Autosincronizables	24
2.4. Funciones hash	25
2.4.1. Integridad de datos	25
2.4.2. Autenticación de mensajes	26
2.4.3. Firmas	26
Lista de figuras	27
Lista de tablas	28
Lista de pseudocódigos	29

Capítulo 1

Introducción

Justificación

Objetivos

Capítulo 2

Antecedentes

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.

Objetivos de la criptografía

La criptografía tiene como finalidad cumplir 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.

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. 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. Ciphertext-only attack

En este ataque el adversario sólo es capaz de obtener la información cifrado, 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. **Known-plaintext attack**

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. **Chosen-plaintext attack**

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. **Adaptively-chosen-plaintext attack**

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. **Chosen and adaptively-chosen-ciphertext attack** En este caso el adversario puede elegir información cifrada y conocer su contenido, dado que tiene acceso a los mecanismos de descifrado.

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 siguiente figura.

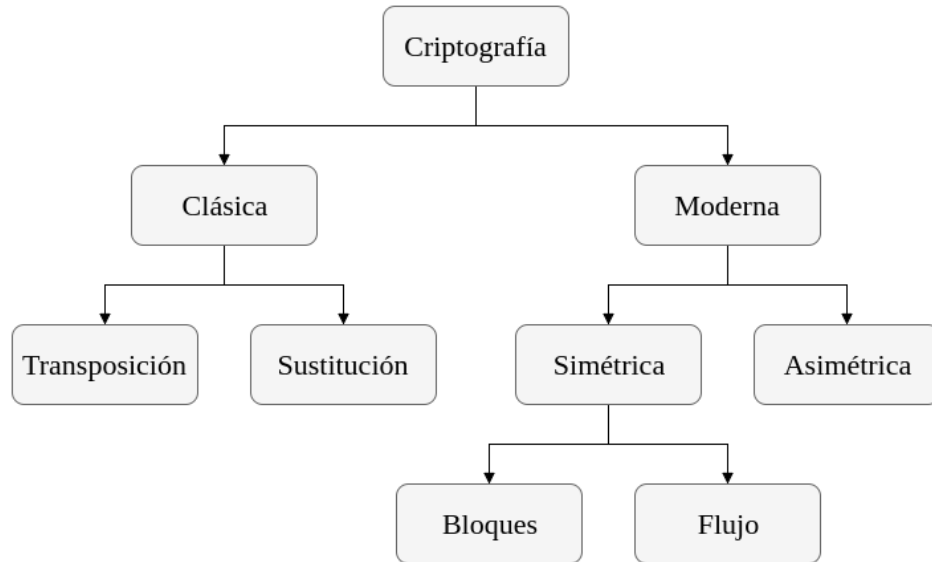


Figura 2.1: Clasificación de la criptografía.

Entrando dentro de 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 correspondiente 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 publica. 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.

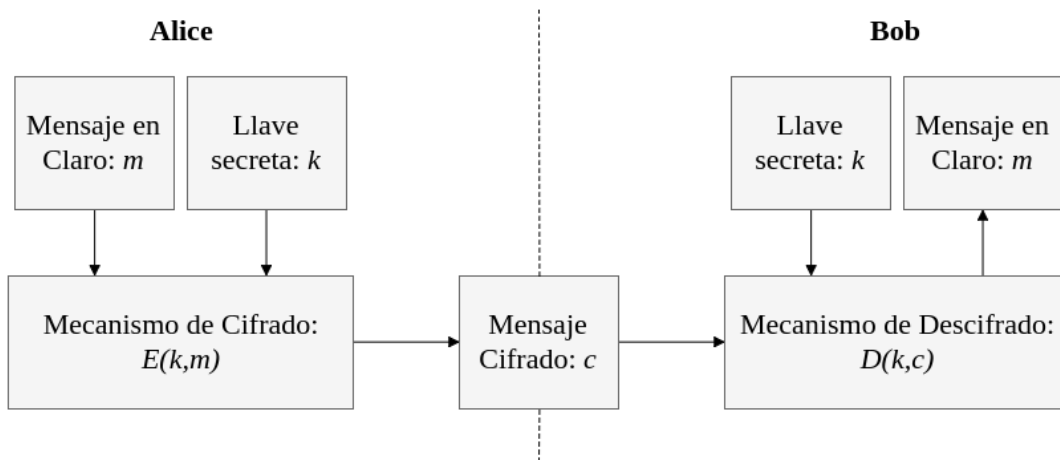


Figura 2.2: Canal de comunicación con criptografía simétrica.

En la figura anterior 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, cifra 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 .

Entre los beneficios de este tipo de criptografía está su utilidad para cifrar archivos personales, su relativa facilidad de uso y para garantizar la confidencialidad e integridad debido a el uso de una llave, y su rapidez, pero en contraparte, su uso genera problemas para organizar y compartir las llaves secretas de una forma segura y eficiente.

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 este 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 publica de de Bob pk 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 el la siguiente figura.

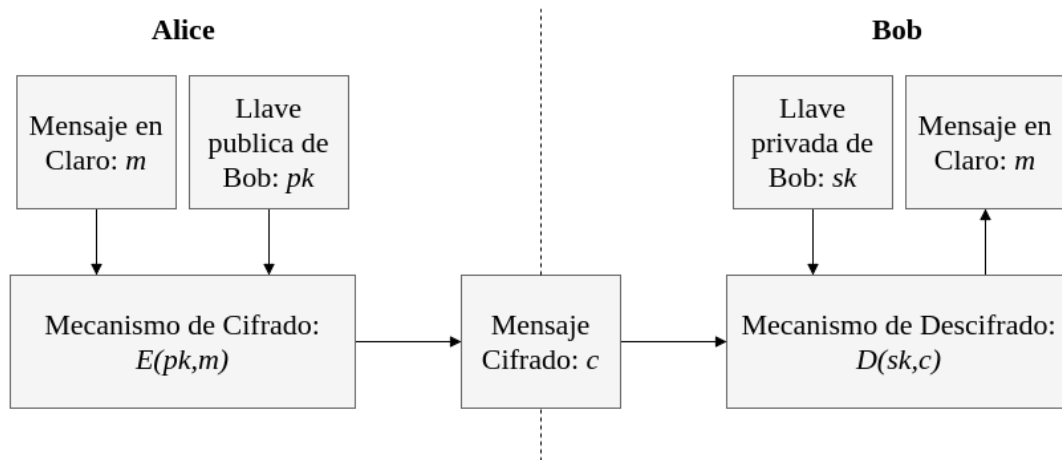


Figura 2.3: Canal de comunicación con criptografía asimétrica.

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

Cifrados por bloques

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

En muchos sistemas criptográficos, estos cifrados 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.

Definición

$$E : \{0, 1\}^r \times \{0, 1\}^n \longrightarrow \{0, 1\}^n, (k, m) \longmapsto E(k, m) \quad (2.1)$$

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 $K = \{0, 1\}^r$. 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. 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

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.

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:

$$L_i = R_{i-1} \tag{2.2}$$

$$R_i = L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, K_i); f(R_{i-1}, K_i) = P(S(E(R_{i-1}) \oplus K_i)) \tag{2.3}$$

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.

```

1  entrada:      64 bits de texto en claro  $M = m_1 \dots m_{64}$ ; llave de 64 bits  $K = k_1 \dots k_{64}$ .
2  salida:      bloque de texto cifrado de 64 bits  $C = c_1 \dots c_{64}$ .
3  inicio
4      Calcular 16 subllaves  $K_i$  de 48 bits partiendo de  $K$ .
5       $(L_0, R_0) \leftarrow IP(m_1 m_2 \dots m_{64})$ 
6      Para  $i$  desde 1 hasta 16: Calcular  $L_i$  y  $R_i$  mediante las ecuaciones mostradas anteriormente.
7      Obtener  $f(R_{i-1}, K_i)$  así:
8          a) Expandir  $R_{i-1} = r_1 r_2 \dots r_{32}$  de 32 a 48 bits usando  $E$ :  $T \leftarrow E(R_{i-1})$ .
9          b)  $T' \leftarrow T \oplus K_i$ . Donde  $T'$  es representado como ocho cadenas de 6 bits cada una  $(B_1, \dots, B_8)$ .
10         c)  $T'' \leftarrow (S_1(B_1), S_2(B_2), \dots, S_8(B_8))$ 
11         d)  $T''' \leftarrow P(T'')$ 
12     fin
13      $b_1 b_2 \dots b_{64} \leftarrow (R_{16}, L_{16})$ .
14      $C \leftarrow IP^{-1}(b_1 b_2 \dots b_{64})$ 
15 fin

```

Pseudocódigo 2.1: 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 $E_K(E_K(x)) = x$ para toda x .
- 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).

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.

```

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

```

Pseudocódigo 2.2: 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 N rondas con N par, aunque se recomienda $N = 2^x$.

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 $Y = (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4)$.

```

1  entrada: 64-bits de datos en claro  $M = m_1 \dots m_{64}$ ; llave de 128-bits  $K = k_1 \dots k_{128}$ .
2  salida: bloque cifrado de 64-bits  $Y = (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4)$ .

```

```

3  inicio
4      Calcular las subllaves  $K_1^{(r)}, \dots, K_6^{(r)}$  para las rondas  $1 \leq r \leq 8$  y  $K_1^{(9)}, \dots, K_4^{(9)}$ 
5      para la transformación de salida.
6       $(X_1, X_2, X_3, X_4) \leftarrow (m_1 \dots m_{16}, m_{17} \dots m_{32}, m_{33} \dots m_{48}, m_{49} \dots m_{64})$  donde  $X_i$  almacena 16 bits.
7      Para la ronda  $r$  desde 1 hasta 8:
8          a)  $X_1 \leftarrow X_1 \times K_1^{(r)} \bmod 2^{16} + 1$ 
9               $X_4 \leftarrow X_4 \times K_4^{(r)} \bmod 2^{16} + 1$ 
10              $X_2 \leftarrow X_2 + K_2^{(r)} \bmod 2^{16}$ 
11              $X_3 \leftarrow X_3 + K_3^{(r)} \bmod 2^{16}$ 
12          b)  $t_0 \leftarrow K_5^{(r)} \times (X_1 \oplus X_3) \bmod 2^{16} + 1$ 
13               $t_1 \leftarrow K_6^{(r)} \times (t_0 + (X_2 \oplus X_4)) \bmod 2^{16} + 1$ 
14               $t_2 \leftarrow t_0 + t_1 \bmod 2^{16}$ 
15          c)  $X_1 \leftarrow X_1 \oplus t_1$ 
16               $X_4 \leftarrow X_4 \oplus t_2$ 
17               $a \leftarrow X_2 \oplus t_2$ 
18               $X_2 \leftarrow X_3 \oplus t_1$ 
19               $X_3 \leftarrow a$ 
20  fin
21  Realizar la transformación de salida:
22       $Y_1 \leftarrow X_1 \times K_1^{(9)} \bmod 2^{16} + 1$ 
23       $Y_4 \leftarrow X_4 \times K_4^{(9)} \bmod 2^{16} + 1$ 
24       $Y_2 \leftarrow X_3 + K_2^{(9)} \bmod 2^{16}$ 
25       $Y_3 \leftarrow X_2 + K_3^{(9)} \bmod 2^{16}$ 
26  fin

```

Pseudocódigo 2.3: 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.

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.

```

1  entrada:  $r, 6 \leq r \leq 10$ ; 64-bits de datos en claro  $M = m_1 \dots m_{64}$ ;  $K = k_1 \dots k_{64}$ .
2  salida: bloque cifrado de 64-bits  $Y = (Y_1, \dots, Y_8)$ .
3  inicio
4      Calcular las subllaves  $K_1, \dots, K_{2r+1}$ 
5       $(X_1, X_2, \dots, X_8) \leftarrow (m_1 \dots m_8, m_9 \dots m_{16}, \dots, m_{57} \dots m_{64})$ 
6      Para  $i$  desde 1 hasta  $r$ :
7          a) Para  $j = 1, 4, 5, 8$ :  $X_j \leftarrow X_j \oplus K_{2i-1}[j]$ 
8              Para  $j = 2, 3, 6, 7$ :  $X_j \leftarrow X_j + K_{2i-1}[j] \bmod 2^8$ 
9          b) Para  $j = 1, 4, 5, 8$ :  $X_j \leftarrow S[X_j]$ 
10             Para  $j = 2, 3, 6, 7$ :  $X_j \leftarrow S_{inversa} X_j$ 
11          c) Para  $j = 1, 4, 5, 8$ :  $X_j \leftarrow X_j + K_{2i}[j] \bmod 2^8$ 
12             Para  $j = 2, 3, 6, 7$ :  $X_j \leftarrow X_j \oplus K_{2i}[j]$ 
13          d) Para  $j = 1, 3, 5, 7$ :  $(X_j, X_{j+1}) \leftarrow f(X_j, X_{j+1})$ .
14          e)  $(Y_1, Y_2) \leftarrow f(X_1, X_3), (Y_3, Y_4) \leftarrow f(X_5, X_7)$ ,
15              $(Y_5, Y_6) \leftarrow f(X_2, X_4), (Y_7, Y_8) \leftarrow f(X_6, X_8)$ .
16             Para  $j$  desde 1 hasta 8:  $X_j \leftarrow Y_j$ 
17          f)  $(Y_1, Y_2) \leftarrow f(X_1, X_3), (Y_3, Y_4) \leftarrow f(X_5, X_7)$ ,
18              $(Y_5, Y_6) \leftarrow f(X_2, X_4), (Y_7, Y_8) \leftarrow f(X_6, X_8)$ .
19             Para  $j$  desde 1 hasta 8:  $X_j \leftarrow Y_j$ .
20  fin
21  Para  $j = 1, 4, 5, 8$ :  $Y_j \leftarrow X_j \oplus K_{2r+1}[j]$ .
22  Para  $j = 2, 3, 6, 7$ :  $Y_j \leftarrow X_j + K_{2r+1}[j] \bmod 2^8$ .
23  fin

```

Pseudocódigo 2.4: 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.

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.

```

1  entrada:       $2w$ -bits de datos en claro  $M = (A, B)$ ;  $r$ ;
2                llave  $K = K[0] \dots K[b-1]$ 
3  salida:       $2w$ -bits de datos cifrados  $C$ .
4  inicio
5      Calcular  $2r+2$  subllaves  $K_0, \dots, K_{2r+1}$ 

```

```

6    $A \leftarrow A + K_0 \bmod 2^w, B \leftarrow B + K_1 \bmod 2^w$ 
7   Para  $i$  desde 1 hasta  $r$ :
8        $A \leftarrow ((A \oplus B) \leftrightarrow B) + K_{2i} \bmod 2^w$ 
9        $B \leftarrow ((B \oplus A) \leftrightarrow A) + K_{2i+1} \bmod 2^w$ 
10  fin
11  Regresar  $C \leftarrow (A, B)$ 
12  fin

```

Pseudocódigo 2.5: RC5, cifrado.

Para descifrar, RC5 utiliza el siguiente algoritmo.

```

1  entrada:  $2w$ -bits de datos cifrados  $C = (A, B)$ ;  $r$ ;
2      llave  $K = K[0] \dots K[b-1]$ 
3  salida:  $2w$ -bits de datos en claro  $M$ .
4  inicio
5      Calcular  $2r+2$  subllaves  $K_0, \dots, K_{2r+1}$ 
6       $A \leftarrow A + K_0 \bmod 2^w, B \leftarrow B + K_1 \bmod 2^w$ 
7      Para  $i$  desde  $r$  hasta 1:
8           $B \leftarrow ((B - K_{2i+1} \bmod 2^w) \leftrightarrow A) \oplus A$ 
9           $A \leftarrow ((A - K_{2i} \bmod 2^w) \leftrightarrow B) \oplus B$ 
10     fin
11     Regresar  $M \leftarrow (A - K_0 \bmod 2^w, B - K_1 \bmod 2^w)$ 
12     fin

```

Pseudocódigo 2.6: RC5, descifrado.

Modos de operación

Por sí solos, los cifrados por bloques solamente permiten el cifrado y descifrado de bloques de información de tamaño fijo. Para la mayoría de los casos, menos de 256 bits **modos de operación** 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. Formalizamos este concepto definiendo a un cifrado por bloques como una función C (ecuación 2.4) y a un modo de operación como una función M (ecuación 2.5).

$$C(L, B) \rightarrow Bc \quad (2.4)$$

En donde L es la llave y B es el bloque a cifrar; ambos con un tamaño definido: $L \in \{0, 1\}^k$ (k es el tamaño de la llave) y $B \in \{0, 1\}^n$ (n es el tamaño de bloque). Bc representa al bloque cifrado, el cuál también tiene longitud n .

$$M(L, T) \rightarrow Tc \quad (2.5)$$

En este caso L es la misma que en 2.4, T y Tc son el texto original y el texto cifrado, respectivamente, y ambos son de longitud arbitraria: $T, Tc \in \{0, 1\}^*$.

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 presentamos a continuación (*Electronic Codebook*, ECB); su uso no es recomendado, pues es muy inseguro cuando el mensaje original es simétrico a nivel de bloque **modos de operacion**. También presentamos otros tres modos, los cuales junto con ECB, son los más comunes.

Electronic Codebook (ECB)

La figura 2.4 muestra un diagrama esquemático de este modo de operación. Según la ecuación 2.5, 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 ($T = B_1 || B_2 || \dots || B_n$).

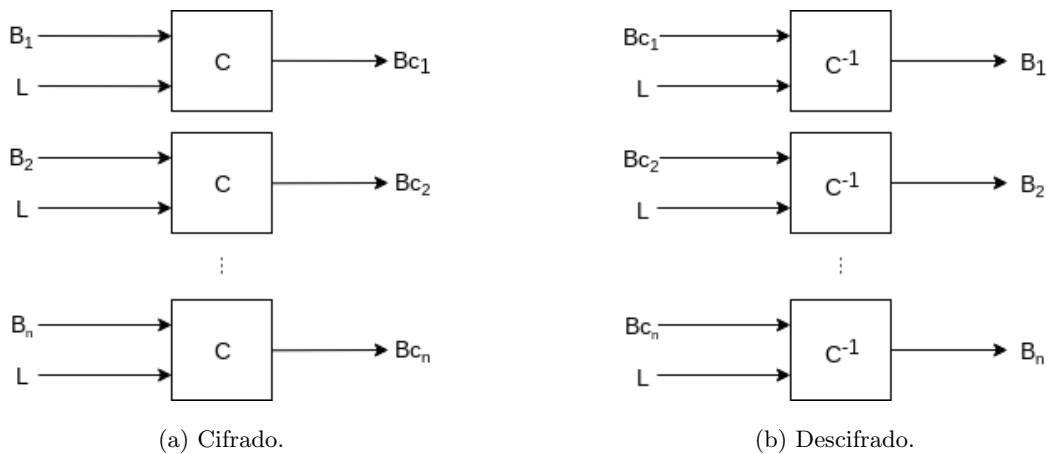


Figura 2.4: Modo de operación ECB.

```

1  entrada: llave  $L$ ; bloques de mensaje  $B_1, B_2 \dots B_n$ .
2  salida: bloques de mensaje cifrado  $B_{c1}, B_{c2} \dots B_{cn}$ .
3  inicio
4    para_todo  $B$ 
5       $B_{c_i} \leftarrow C(L, B_i)$ 
6    fin
7    regresar  $B_c$ 
8  fin

```

Pseudocódigo 2.7: Modo de operación ECB, cifrado.

```

1  entrada: llave  $L$ ; bloques de mensaje cifrado  $B_{c1}, B_{c2} \dots B_{cn}$ .
2  salida: bloques de mensaje original  $B_1, B_2 \dots B_n$ .
3  inicio
4    para_todo  $B_c$ 
5       $B_i \leftarrow C^{-1}(L, B_{ci})$ 
6    fin
7    regresar  $B$ 
8  fin

```

Pseudocódigo 2.8: 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 bloque 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.

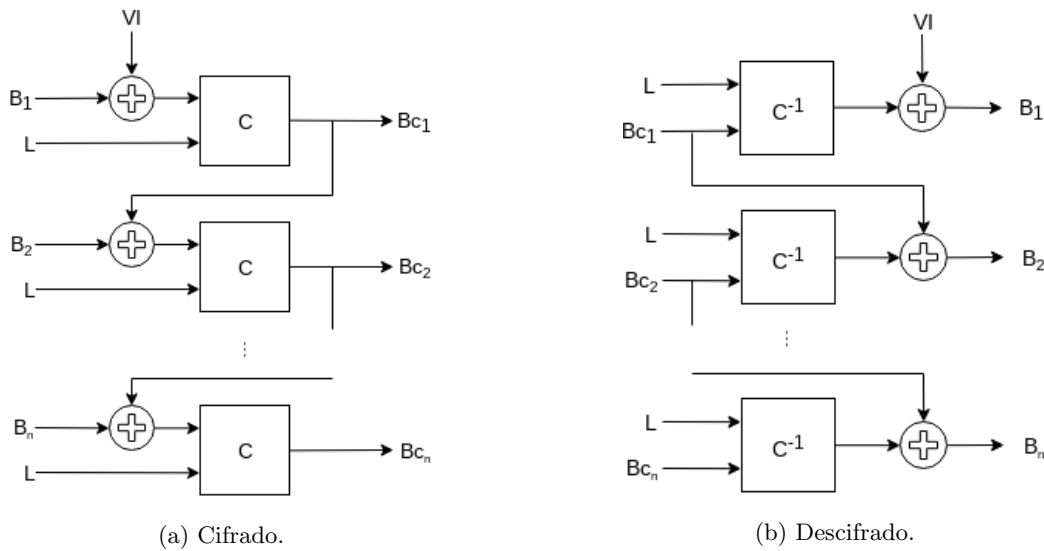


Figura 2.5: Modo de operación CBC.

En la figura 2.5 se muestran los diagramas esquemáticos para cifrar y descifrar; en los pseudocódigos 2.9 y 2.10 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.

```

1  entrada: llave  $L$ ; vector de inicialización  $VI$ ;
2          bloques de mensaje  $B_1, B_2 \dots B_n$ .
3  salida: bloques de mensaje cifrado  $Bc_1, Bc_2 \dots Bc_n$ .
4  inicio
5       $Bc_0 \leftarrow VI$  // El vector de inicialización
6      para_todo  $B$  // entra al primer bloque.
7           $Bc_i \leftarrow C(L, B_i \oplus Bc_{i-1})$ 
8      fin
9      regresar  $Bc$ 
10 fin

```

Pseudocódigo 2.9: Modo de operación CBC, cifrado.

```

1  entrada: llave  $L$ ; vector de inicialización  $VI$ ;
2          bloques de mensaje cifrado  $Bc_1, Bc_2 \dots Bc_n$ .
3  salida: bloques de mensaje original  $B_1, B_2 \dots B_n$ .
4  inicio
5       $Bc_0 \leftarrow VI$ 
6      para_todo  $Bc$ 
7           $B_i \leftarrow C^{-1}(L, Bc_i) \oplus Bc_{i-1}$ 
8      fin
9      regresar  $B$ 
10 fin

```

Pseudocódigo 2.10: 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 2.6).

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 2.11); 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 2.6).

$$A \oplus B = C \quad \Rightarrow \quad A = B \oplus C \quad (2.6)$$

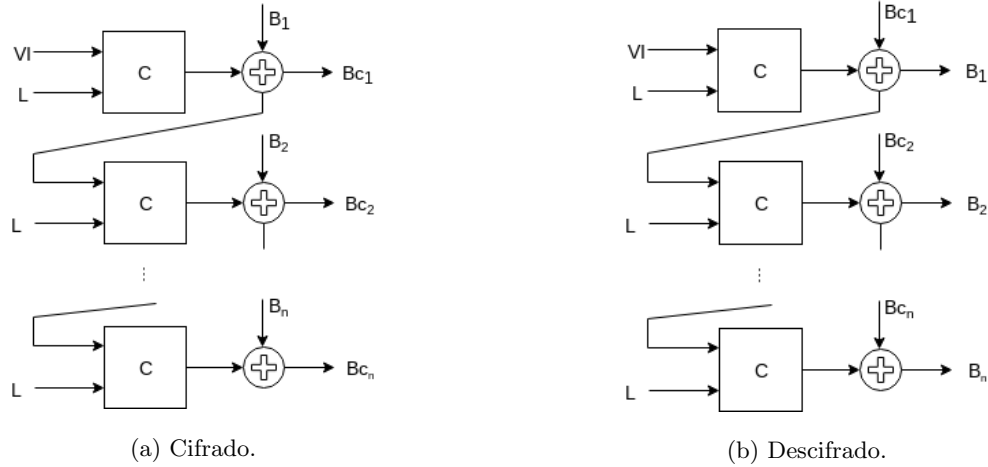


Figura 2.6: Modo de operación CFB.

```

1  entrada: llave  $L$ ; vector de inicialización  $VI$ ;
2           bloques de mensaje (cifrado o descifrado)  $B_1, B_2 \dots B_n$ .
3  salida: bloques de mensaje (cifrado o descifrado)  $Bc_1, Bc_2 \dots Bc_n$ .
4  inicio
5       $Bc_0 \leftarrow VI$ 
6  para_todo  $B$ 
7       $Bc_i \leftarrow C(L, Bc_{i-1}) \oplus B_i$ 
8  fin
9  regresar  $Bc$ 
10 fin

```

Pseudocódigo 2.11: Modo de operación CFB (cifrado y descifrado).

Output Feedback (OFB)

Este es muy similar al anterior (CFB), salvo porque 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.

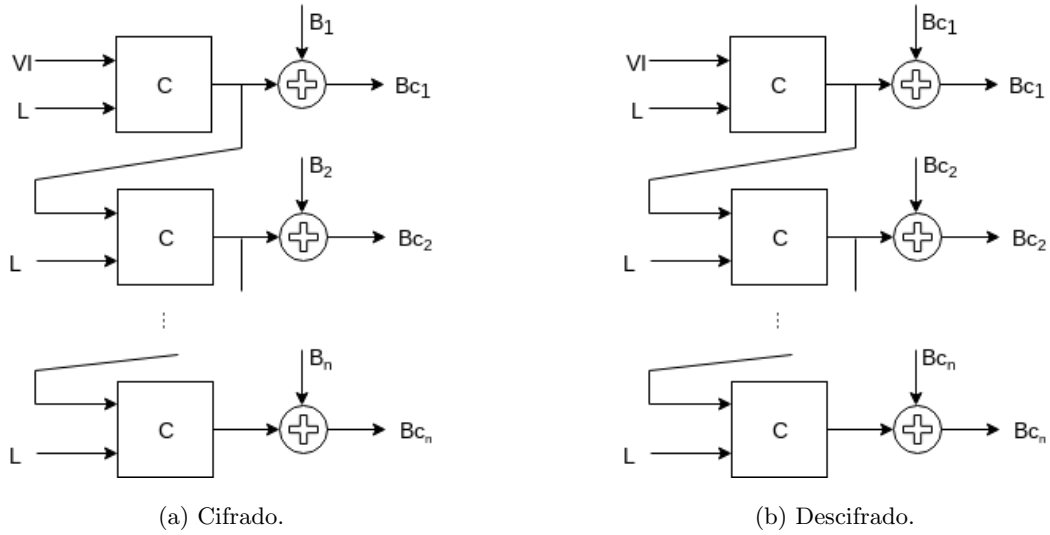


Figura 2.7: Modo de operación OFB.

```

1  entrada: llave  $L$ ; vector de inicialización  $VI$ ;
2           bloques de mensaje (cifrado o descifrado)  $B_1, B_2 \dots B_n$ .
3  salida: bloques de mensaje (cifrado o descifrado)  $Bc_1, Bc_2 \dots Bc_n$ .
4  inicio
5      auxiliar  $\leftarrow VI$ 
6      para_todo  $B$ 
7          auxiliar  $\leftarrow C(L, \text{auxiliar})$ 
8           $Bc_i \leftarrow \text{auxiliar} \oplus B_i$ 
9      fin
10     regresar  $Bc$ 
11 fin

```

Pseudocódigo 2.12: Modo de operación OFB (cifrado y descifrado).

Cifrados de flujo

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 de manera aleatoria, o por un algoritmo pseudoaleatorio que toma una semilla a la entrada, o por una semilla y símbolos cifrados anteriormente.

Entre las ventajas de los cifrados de flujo sobre los cifrados de bloque se encuentran el hecho de que son más rápidos en hardware, son 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 útiles en casos en los que hay probabilidades altas de errores en la transmisión **menezes**

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.

Una clasificación común es en *síncronos* y en *autosincronizables*. A continuación describimos 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.

$$e_{i+1} = f(e_i, L) \quad (2.7)$$

$$l_i = g(e_i, L) \quad (2.8)$$

$$c_i = h(l_i, m_i) \quad (2.9)$$

La letra e representa el estado del cifrado, L es la llave, l es la salida del flujo de llave, c es el texto cifrado y m es el texto en claro. La función de la ecuación 2.7 (f) es la que describe el cambio de estado; este se determina a

partir del estado actual y de la llave. En la ecuación 2.8 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 (2.9, h) describe la acción de combinar el flujo de la llave con el mensaje, y así obtener el texto cifrado.

En la figura 2.8 se describe de manera gráfica las operaciones de cifrado y descifrado; estas guardan muchas similitudes con el modo de operación OFB, con la única excepción de que este trabaja con bloques del tamaño del cifrado subyacente. En otras palabras, si definiéramos el tamaño del bloque (y en consecuencia el tamaño del vector de inicialización) como 1, entonces OFB sería un cifrado de flujo síncrono.

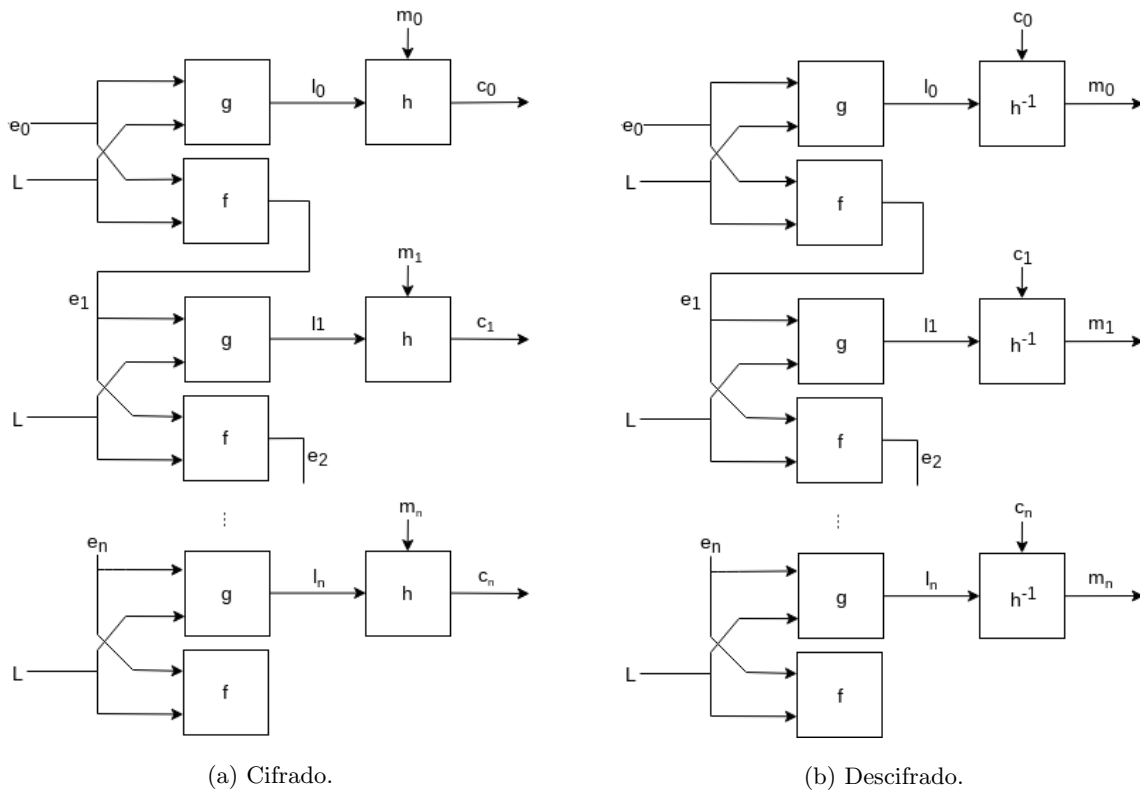


Figura 2.8: Esquema general de un cifrado de flujo síncrono.

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.

$$e_{i+1} = (c_{i-t}, c_{i-t+1}, \dots, c_{i-1}) \quad (2.10)$$

$$l_i = g(e_i, L) \quad (2.11)$$

$$c_i = h(l_i, m_i) \quad (2.12)$$

La notación es la misma que en las ecuaciones 2.7, 2.8 y 2.9. En este caso, el próximo estado depende de t (el tamaño de la ventana) dígitos cifrados anteriormente. En la figura 2.9 se describe de manera gráfica el proceso de cifrado y descifrado.

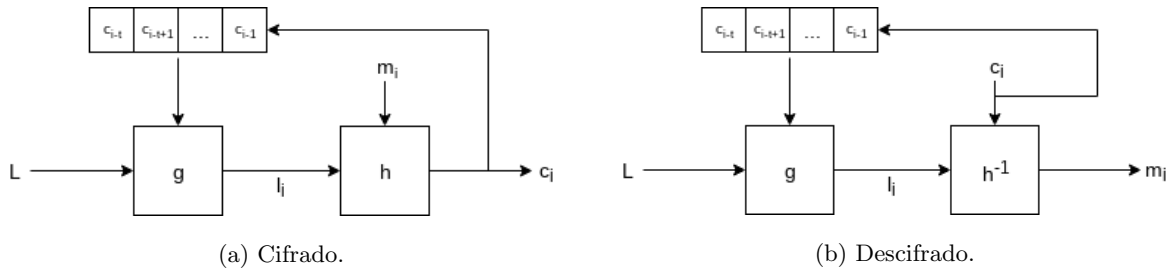


Figura 2.9: Esquema general de un cifrado de flujo autosincronizable.

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.

Funciones hash

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.

Si se tiene una función hash cuya salida es una cadena de n -bits, la probabilidad de que una cadena aleatoria sea mapeada a un valor hash de n -bits es de 2^n . Si se desea utilizar a una función hash h en un ámbito criptográfico, es importante que cumpla con dos cosas: primero, que sea resistente a las colisiones o, en otras palabras, que no sea computacionalmente factible encontrar dos entradas distintas que den el mismo valor (una colisión entre las entradas x y y tal que $h(x) = h(y)$); y segundo, que tenga resistencia a una segunda preimagen, o sea que, dado un valor hash $h(z) = y$, no sea computacionalmente factible encontrar una entrada x tal que $h(x) = y$ mientras $z \neq x$.

Algunos ejemplos de las funciones hash criptográficas 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.

Matemáticamente, una función hash es una función

$$h : \{0, 1\}^* \longrightarrow \{0, 1\}^n, m \longmapsto h(m) \quad (2.13)$$

La longitud de n suele ser entre 128 y 512 bits. Es importante resaltar que uno de los requerimientos básicos de las funciones hash es que los valores $h(m)$ sean fáciles de calcular, de manera, ya sea en software o en hardware, sean prácticas al implementarse.

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.

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 (MDC, por sus siglas en inglés).

Autenticación de mensajes

Otra importante aplicación de las funciones hash es la autenticación del mensaje. Si una función hash es utilizada para la autenticación de mensajes, es llamada código de autenticación de mensajes (MAC, por sus siglas en inglés). MAC es una técnica simétrica estándar muy utilizada para autenticar y proteger la integridad de un mensaje. Dependen de una llave secreta que tienen las partes interesadas y, al contrario de las firmas electrónicas donde solo una persona conoce la llave privada y es capaz de generar la firma, cada uno de los participantes puede producir el MAC válido para un mensaje. La llave privada k es utilizada para parametrizar la función hash.

$$(h_k : \{0, 1\}^* \longrightarrow \{0, 1\}^n)_{k \in K} \quad (2.14)$$

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):

$$\sigma = h(m)^d \bmod n \quad (2.15)$$

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 .

Lista de figuras

2.1. Clasificación de la criptografía.	8
2.2. Canal de comunicación con criptografía simétrica.	8
2.3. Canal de comunicación con criptografía asimétrica.	9
2.4. Modo de operación ECB.	17
2.5. Modo de operación CBC.	18
2.6. Modo de operación CFB.	20
2.7. Modo de operación OFB.	21
2.8. Esquema general de un cifrado de flujo síncrono.	23
2.9. Esquema general de un cifrado de flujo autosincronizable.	24

Lista de tablas

Lista de pseudocódigos

2.1. DES, cifrado.	12
2.2. FEAL-8, cifrado.	13
2.3. IDEA, cifrado.	13
2.4. SAFER K-64, cifrado.	15
2.5. RC5, cifrado.	15
2.6. RC5, descifrado.	16
2.7. Modo de operación ECB, cifrado.	17
2.8. Modo de operación ECB, descifrado.	18
2.9. Modo de operación CBC, cifrado.	19
2.10. Modo de operación CBC, descifrado.	19
2.11. Modo de operación CFB (cifrado y descifrado).	20
2.12. Modo de operación OFB (cifrado y descifrado).	21