MESSAGE INTEGRITY

Funciones hash

Funciones hash en la criptografía

Lab_04

Lab_05

Función hash MD5, estructura y operaciones

Función hash SHA-1

Función hash SHA-2

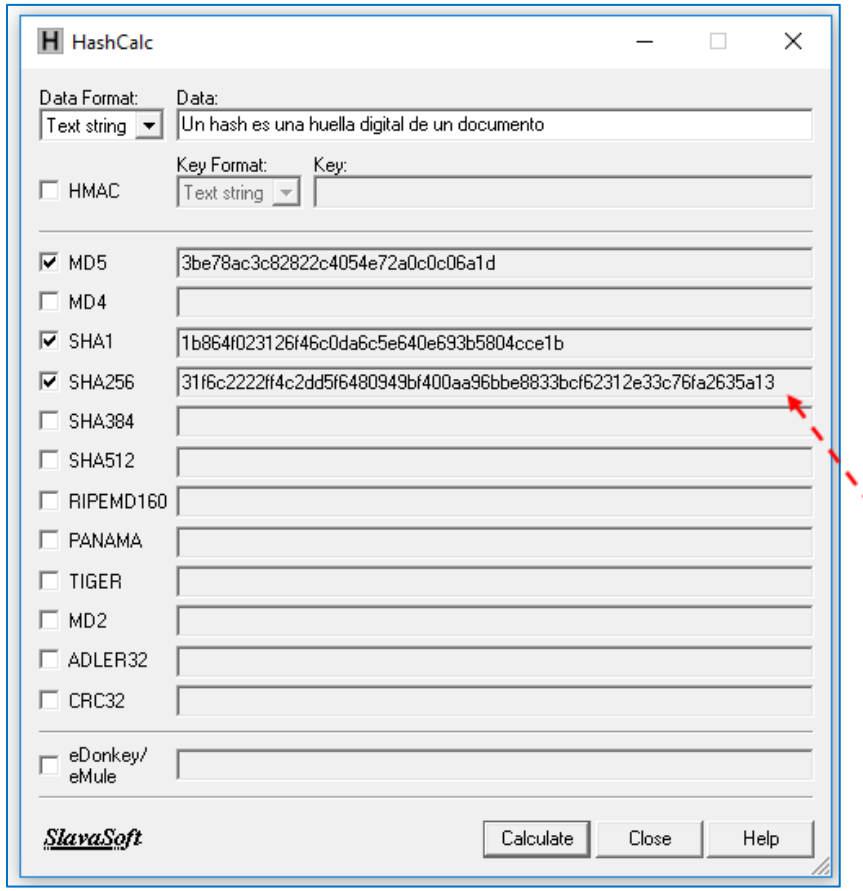
¿Qué son las funciones hash?

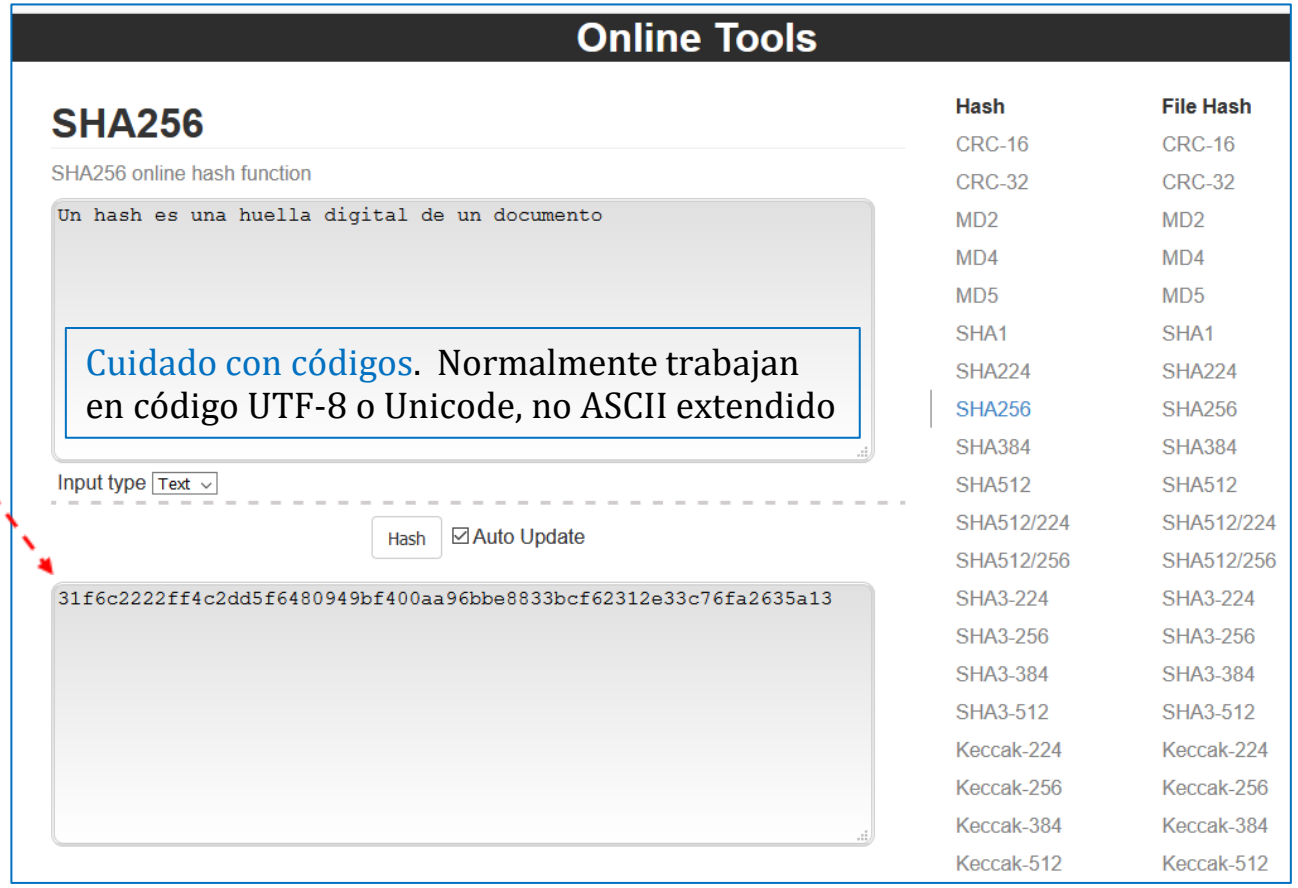
- Una función hash o resumen (*digest*) puede definirse como una función que asocia a un texto, archivo o documento electrónico M de cualquier tamaño, un resumen H = h(M) suyo, representado en bits, con una longitud fija y supuestamente único
- De esta manera, el hash es una especie de huella digital del archivo o texto, que se muestra siempre en formato hexadecimal
- El tamaño de h(M) dependerá del algoritmo utilizado
- Así, por ejemplo, la función hash MD5 devuelve 128 bits, el hash SHA-1 devuelve 160 bits y los hashes SHA-2 y SHA-3 devuelven 224, 256, 384 y 512 bits, al aplicarlos sobre un texto o archivo

El hash no es un sistema de cifra

- Es un error muy común señalar a las funciones hash como algoritmos de cifra
- No son algoritmos de cifra porque no hay ninguna clave
- No confundir con HMAC, que sí incluye una clave
- Dependiendo del entorno de ejecución (hardware, software, web online), las funciones hash tienen un rendimiento o tasa que va desde las pocas decenas de MegaBytes por segundo a dos o tres centenas de MegaBytes por segundo
- Para las operaciones de firma digital donde se usan las funciones hash, esas velocidades son adecuadas. En otros entornos, como los de informática forense, esa velocidad podría ser crítica

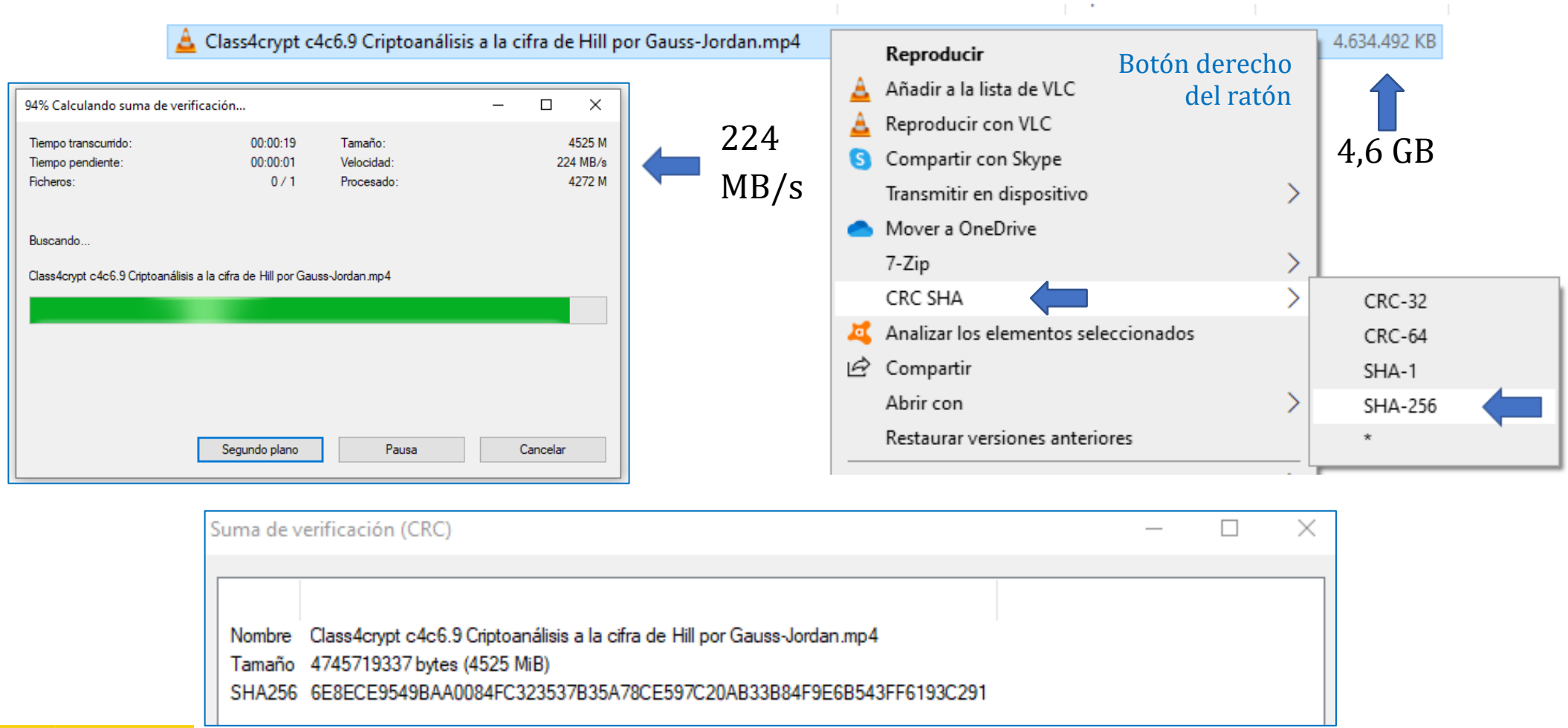
Ejemplos de hash con Hashcalc y Online





https://emn178.github.io/online-tools/sha256.html

Ejemplo de hash con la utilidad de 7-zip



Utilidad del hash en la criptografía

- Para realizar una firma digital F, habrá que realizar una cifra usando la clave privada del emisor con un algoritmo de criptografía asimétrica
- En RSA, si esta clave privada es d_E, el módulo de cifra es n_E y hay que firmar el mensaje M, la operación sería $F = M^{dE} \bmod n_E$
- Pero sabemos que los algoritmos de cifra asimétrica, que permiten la firma digital a diferencia de los algoritmos de cifra en simétrica, tienen velocidades de cifra/firma mucho menores que estos últimos
- Así, la firma no se hará sobre el mensaje sino sobre el resultado de aplicar un hash a ese mensaje o documento: $F = h(M)^{dE} \bmod n_E$
- Esto permite agilizar la operación de firma y, también, comprobar en recepción la integridad del documento recibido firmado digitalmente

Principio del palomar, unicidad y colisiones

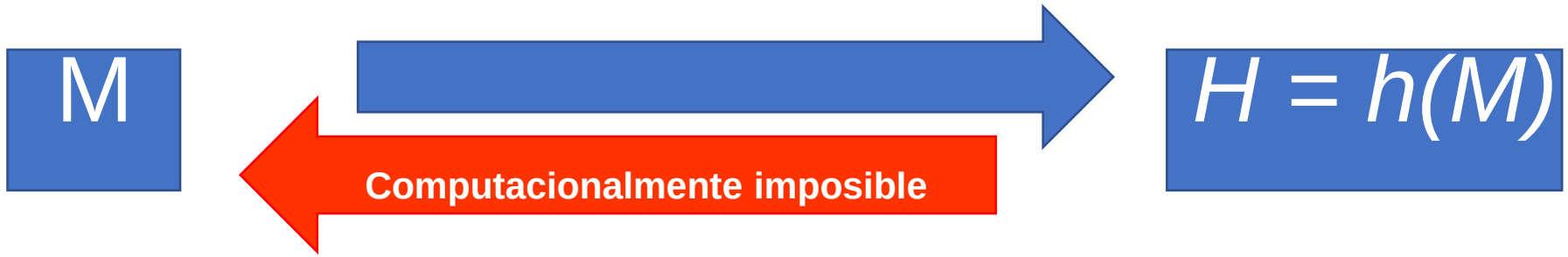
- Como es obvio, en tanto el hash o huella digital será un valor de bits mucho menor que los bits del archivo o mensaje al que se le aplica esa función, no se puede afirmar que el hash sea único
- Habrá una probabilidad de que dos archivos o mensajes diferentes tengan el mismo hash, lo que llamaremos una colisión
- Lógicamente esta probabilidad va a depender del tamaño del hash
- Esto se conoce como el principio del palomar (Johann Dirichlet), que dice que si hay más palomas que huecos en el palomar, entonces en alguno de estos huecos habrá más de una paloma

La seguridad del resumen de un hash

- Si una función hash nos devuelve 4 bits, los $2^4 = 16$ estados posibles serán 0000, 0001, 0010, 0011, 0100, 0101, 0110, 0111, 1000, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110, 1111, todos equiprobables
- La pregunta que nos puede preocupar es: ¿cuál sería la probabilidad de que dos mensajes distintos tengan igual función hash? Si se firma un hash h(M), queremos estar seguros que sea el del mensaje original
- En este escenario la probabilidad será de $1/2^4 = 1/16$
- Con una probabilidad de $1/2^4$ (6,25% muy alta) podríamos tener dos mensajes diferentes (incluso contradictorios) con iguales hash
- Por ello, los hashes usan centenas de bits como resumen, hoy en día al menos de 256 bits, y esa probabilidad baja a $1/2^{256}$ … en la *práctica* 0

Propiedades de las funciones hash (1/7)

1. Facilidad de cálculo
   - Deberá ser fácil y rápido calcular h(M) a partir de M
2. Unidireccionalidad
   - Conocido un resumen H = h(M), debe ser computacionalmente imposible o no factible encontrar el mensaje M a partir del resumen H
   - Aunque exista una forma para resolver el problema, el tiempo y los recursos necesarios para revertir h(M) deberán ser muy difíciles de cumplir



Propiedades de las funciones hash (2/7)

3. Compresión

- A partir de un mensaje M de cualquier longitud, el resumen H = h(M) debe tener una longitud fija
- En la firma digital, lo normal es que la longitud de h(M) sea menor que el mensaje M a firmar
- Aunque tenga cierto parecido, una función hash no es lo mismo que la función zip para compresión de archivos
- La función zip recodifica el archivo mediante un codificador óptimo y, por tanto, optimiza el número de bits comprimiendo el archivo todo lo que puede, usando entre otras cosas la redundancia del lenguaje
- En cambio una función hash devuelve un resumen de longitud fija
- Si M tiene menos bits que el resultado del hash, como sería el caso del uso de hashes en contraseñas, lógicamente no se cumplirá esta propiedad.

Propiedades de las funciones hash (3/7)

4. Difusión o efecto avalancha

- El hash h(M) debe ser una función compleja de todos los bits del mensaje M
- Por tanto, si se modifica un solo bit del mensaje M, el hash h(M) debería cambiar en media la mitad de sus bits
- MD5 sobre M_1 y M_2 que difieren en 1 bit (B = 01000010 y C = 01000011)
- M_1 = BEBA COCA COLA $h(M_1)$ = `EBC97CD6472A3FDBE53B09F6E2BA8687`
- M_2 = BEBA BOCA COLA $h(M_2)$ = `967A99F55CF64973C553374C08A7BD72`

$h(M_1)$ 1110 1011 1100 1001 0111 1100 1101 0110 0100 0111 0010 1010
0011 1111 1101 1011 1110 0101 0011 1011 0000 1001 1111 0110
1110 0010 1011 1010 1000 0110 1000 0111

$h(M_2)$ 1001 0110 0111 1010 1001 1001 1111 0101 0101 1100 1111 0110
0100 1001 0111 0011 1100 0101 0101 0011 0011 0111 0100 1100
0000 1000 1010 0111 1011 1101 0111 0010

De los 128 bits de MD5, los 70 bits marcados en rojo en $h(M_2)$ indican cambios que se han producido entre los hashes de $h(M_1)$ y $h(M_2)$

Propiedades de las funciones hash (4/7)

5. No predictibilidad

- La fortaleza de las funciones hash reside en la no predictibilidad de la salida obtenida, o del valor resumen o hash
- Es decir, si se calculan los hashes SHA-256 de los números 0, 1, 2 y 3, no será posible predecir cuál es el valor del hash SHA-256 del número 4

SHA-256 0: 5FECEB66FFC86F38D952786C6D696C79C2DBC239DD4E91B46729D73A27FB57E9
SHA-256 1: 6B86B273FF34FCE19D6B804EFF5A3F5747ADA4EAA22F1D49C01E52DDB7875B4B
SHA-256 2: D4735E3A265E16EEE03F59718B9B5D03019C07D8B6C51F90DA3A666EEC13AB35
SHA-256 3: 4E07408562BEDB8B60CE05C1DECFE3AD16B72230967DE01F640B7E4729B49FCE
SHA-256 4: ¿?

- Teóricamente, una función hash debería comportarse como una función de generación de números aleatorios, conocida habitualmente como un oráculo aleatorio (*random oracle*), especie de caja negra que responde a cada consulta con una respuesta realmente aleatoria

Propiedades de las funciones hash (5/7)

6. Resistencia a preimagen (o primera preimagen)

- Dado un valor resumen H = h(M) debe de ser computacionalmente imposible encontrar una preimagen M para ese valor H
- Es decir, será computacionalmente difícil que, conocido H, se encuentre un mensaje M tal que h(M) = H (unidireccionalidad)
- La resistencia a primera preimagen depende de la longitud n del resumen proporcionado por la función hash
- Mediante técnicas de fuerza bruta, en media se podría obtener una preimagen de un hash H después de $2^{(n-1)}$ intentos
- Por ejemplo
  - Para MD5 $2^{(128-1)} = 2^{127} = 1{,}701 \times 10^{38}$ intentos
  - Para SHA-1 $2^{(160-1)} = 2^{159} = 7{,}307 \times 10^{47}$ intentos
  - Para SHA-256 $2^{(256-1)} = 2^{255} = 5{,}789 \times 10^{76}$ intentos

Propiedades de las funciones hash (6/7)

7. Resistencia simple a colisiones (o segunda preimagen)

- El objetivo de toda función hash es que sea computacionalmente difícil que, conocido el mensaje de entrada M, se encuentre un mensaje de entrada M' (distinto a M) de forma que h(M) = h(M')
- Así, la resistencia simple a colisiones pretende evitar que un potencial atacante que disponga de un mensaje M y, por tanto, su correspondiente hash h(M), pueda encontrar otro mensaje M' cuyo hash h(M') sea el mismo que el anterior, lo que le permitiría poder reemplazar un mensaje M por otro M'
- Hay que recordar que lo que se firma son los hashes, no mensajes ni archivos
- La probabilidad de encontrar una segunda preimagen para una función hash es equivalente a la de encontrar una primera preimagen, en media $1/2^{n-1}$
- Por lo tanto, cualquier función hash resistente a segunda preimagen será resistente también a primera preimagen

Propiedades de las funciones hash (7/7)

8. Resistencia fuerte a colisiones

- Será computacionalmente difícil encontrar un par de mensajes al azar (M, M') de forma que sus hashes h(M) = h(M') sean iguales
- Esta resistencia fuerte está relacionada con el ataque conocido como paradoja del cumpleaños
- Si un hash tiene n bits, la probabilidad media de que prospere un ataque por paradoja del cumpleaños será igual a $1/(2^{(n/2)})$. Es decir, deberíamos hacer una media de $2^{n/2}$ intentos, una disminución de cómputo muy considerable
- Por ejemplo
  - Para MD5 $2^{(128/2)} = 2^{64} = 1{,}845 \times 10^{19}$ intentos
  - Para SHA-1 $2^{(160/2)} = 2^{80} = 1{,}209 \times 10^{24}$ intentos
  - Para SHA-256 $2^{(256/2)} = 2^{128} = 3{,}403 \times 10^{38}$ intentos
- ¿Cómo puede llevarse a cabo un ataque mediante la paradoja del cumpleaños?

La paradoja del cumpleaños

- Paradójico: “Hecho o expresión aparentemente contrarios a la lógica”
- Se conoce como paradoja del cumpleaños al problema matemático que nos dice que la confianza o probabilidad mayor que el 50% de que dos personas al azar estén de cumpleaños el mismo día se supera dentro de un grupo de solo 23 personas, y esta probabilidad llega al 99,7% si ese grupo cuenta con 57 personas, siempre probabilístico
- No es una paradoja porque no contradice la lógica sino la intuición
- Explicación: con un mapa de 365 días (sin contar año bisiesto) la primera persona consultada marca una fecha, estando los 365 días libres. La segunda persona consultada cuenta ahora solo 365- 1 días, y así sucesivamente. Es una serie, en donde el escenario con días libres va disminuyendo a cada nueva consulta.

Ataque por paradoja de cumpleaños a hash

- Se crean $2^{n/2}$ textos verdaderos y sus correspondientes $2^{n/2}$ textos falsos, hasta que los hashes de texto verdadero y falso colisionen, usando por ejemplo estos sinónimos marcados entre paréntesis {} para un hash de 20 bits, con $2^{20} = 1.048.576$ valores

Estimado {Querido} amigo {compañero}: — Texto Verdadero

Te envío {hago llegar} esta carta {nota} para indicarte {darte a conocer} que tu número {cupón} ha sido premiado {agraciado} con el premio principal {gordo} de la lotería.
Te envío {Recibe} un cordial saludo {fuerte abrazo}, María.

Aquí $2^{10} = 1.024$ permutaciones de varios textos verdaderos

Estimado {Querido} amigo {compañero}: — Texto Falso

Te envío {hago llegar} esta carta {nota} para indicarte {darte a conocer} que tu número {cupón} NO ha sido premiado {agraciado} con el premio principal {gordo} de la lotería.
Te envío {Recibe} un cordial saludo {fuerte abrazo}, María.

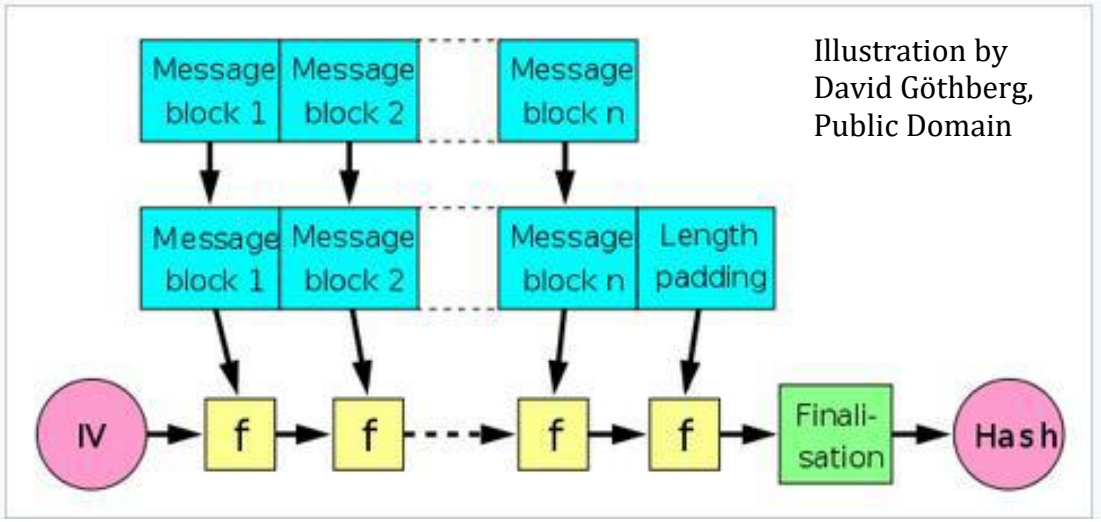
Aquí $2^{10} = 1.024$ permutaciones de varios textos falsos

Construcción de hashes

- Funciones hash iterativas
  - Procesamiento de un mensaje en bloques, aplicando el mismo algoritmo de manera consecutiva o iterativa, que se aplica desde años 80
  - Funciones hash basadas en compresión
    - Transformación de la entrada en una salida de menor tamaño (lo normal)
    - Usa una estructura o construcción de Merkle-Damgård
    - Funciones resumen típicas: MD5, SHA-1 y SHA-2
  - Funciones hash basadas en permutaciones
    - Transformación de la entrada en una salida de igual tamaño
    - Usa funciones esponja (sponge)
    - Función resumen típica: SHA-3 (Keccak)

La estructura de Merkle-Damgård

- Se construyen bloques de 512 bits a partir del mensaje M
- Al último bloque se le añade siempre bits de relleno, al menos 1 byte, y se indica el tamaño o longitud de M



- Cada bloque de 512 bits se usa en un conjunto de operaciones f con puertas lógicas y con un vector IV de x palabras de 32 bits
- Para MD5 x = 4, para SHA-1 x = 5 y para SHA-256 x = 8
- El hash es el último valor del vector IV después del último bloque

Añadiendo relleno y longitud en el hash

- Normalmente, el relleno se hace con bytes 0, es decir 0x 00
- Pero no se usa porque esto podría acarrear el siguiente problema
- Supongamos un hash que forme bloques de 8 bytes sobre el texto M = Hola amigo = 0x 486f6c6120616d69 676f, longitud 10 bytes
- Relleno de ceros: 0x 486f6c6120616d69 676f000000000000
- Pero el hash de M = 0x 486f6c6120616d69 676f sería igual al hash de M = 0x 486f6c6120616d69 676f00, por ejemplo, lo cual es inaceptable. Por eso se cambia a 1 el primer bit de los bytes de relleno 0x 80 = 1000 0000 y los demás son 0x = 00 = 0000 0000
- Además, para evitar ataques por extensión de la longitud, se reserva un bloque de bytes al final para indicar la longitud de M

Cronología de los algoritmos de hash

- **N-Hash**: Nippon Telephone and Telegraph, 1990. Resumen de 128 bits
- **Snefru**: Ralph Merkle, 1990. Resúmenes entre 128 y 256 bits. Ha sido criptoanalizado y es lento
- **MD4:** Ronald L. Rivest, 1990. Resumen de 128 bits
- **Haval:** Yuliang Zheng, Josef Pieprzyk y Jennifer Seberry, 1992. Resúmenes hasta 256 bits. Admite 15 configuraciones diferentes.
- **RIPEMD:** Comunidad Europea, RACE, 1992. Resumen de 160 bits
- **MD5:** Ronald L. Rivest, 1991. Resumen de 128 bits. Mejoras sobre MD2 y MD4 (1990), más lento pero con mayor nivel de seguridad
- **SHA-0** (o SHA): National Security Agency (NSA), 1993. Resumen de 160 bits. Vulnerable y reemplazado por SHA-1
- **SHA-1:** National Security Agency (NSA), 1994. Similar a MD5 pero con resumen de 160 bits
- **Tiger:** Ross Anderson, Eli Biham, 1996. Resúmenes hasta 192 bits. Optimizado para máquinas de 64 bits (Alpha)
- **Panama:** John Daemen, Craig Clapp, 1998. Resúmenes de 256 bits. Trabaja en modo función hash o como cifrador de flujo
- **SHA-2:** National Security Agency (NSA), 2001-2004. Resúmenes entre 224 y 512 bits (224, 256, 384, o 512). Mejoras sobre SHA-1
- **SHA-3** (Keccak): Guido Bertoni, Joan Daemen, MichaÎl Peeters y Gilles Van Assche, 2015. Resúmenes arbitrarios estándar (224, 256, 384, o 512). Más robusto que SHA-2

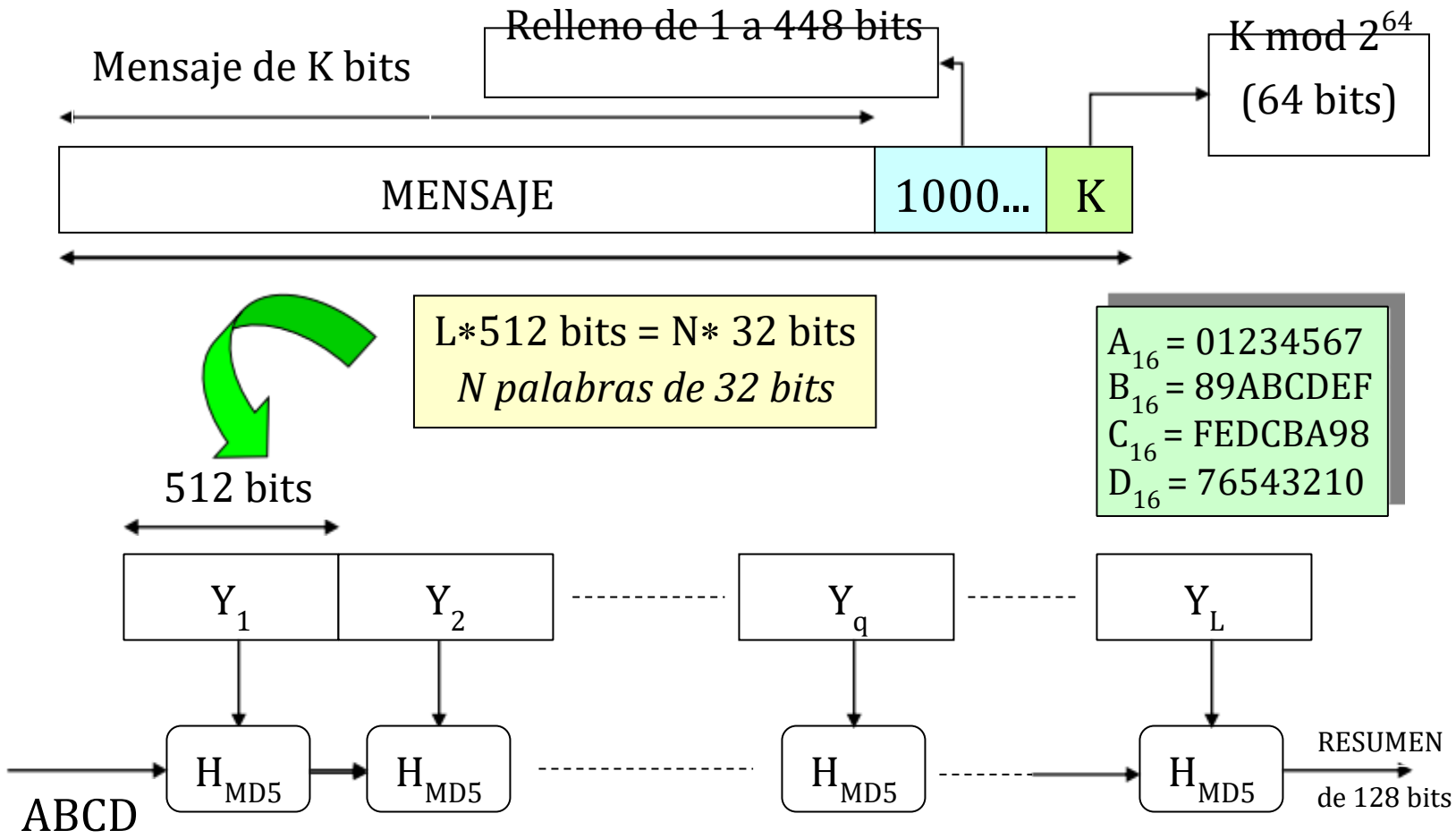
Algoritmo MD5 Message Digest 5 (1/2)

- MD5 fue creado por Ronald Rivest en 1991 y presenta algunas mejoras con respecto a MD2 y MD4 del mismo autor (1990)
- Esta función ya está obsoleta desde mediados de 2005. No obstante, se sigue utilizando en diferentes aplicaciones locales, aunque no en Internet. Es interesante su estudio dada la sencillez del algoritmo, su rapidez y su generalidad
- Procesa bloques de 512 bits con una salida de 128 bits
- Expande el mensaje hasta una longitud 64 bits inferior a un múltiplo de 512 bits. Para el relleno, añade un 1 seguido de tantos 0 como sean necesarios y reserva los últimos 64 bits para añadir información sobre la longitud del mensaje

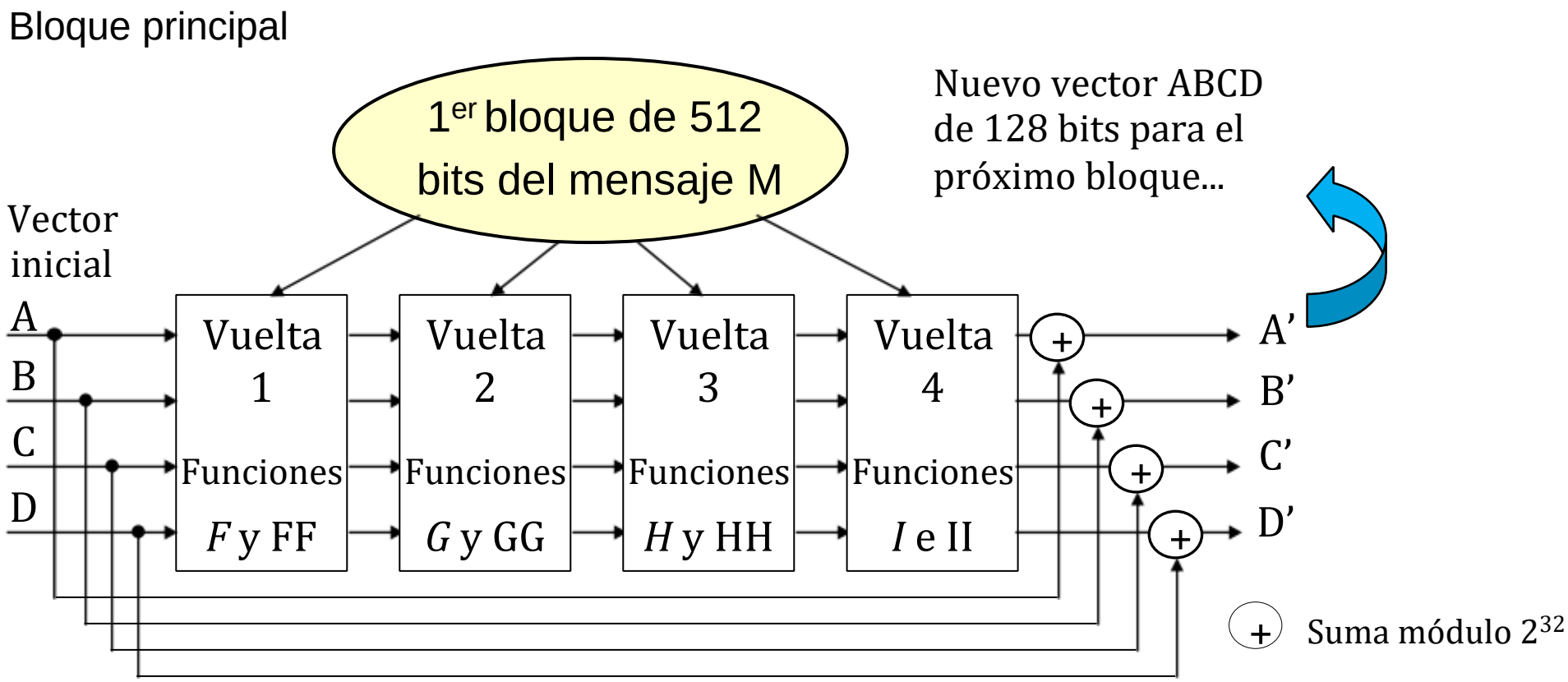
Algoritmo MD5 Message Digest 5 (2/2)

- El algoritmo comienza con cuatro vectores iniciales (IV) ABCD de 32 bits cada uno, cuyo valor inicial no es secreto. A estos vectores y al primer bloque de 512 bits de M se le aplican 64 operaciones de 32 bits con puertas lógicas, cuyo carácter es no lineal
- Las 64 operaciones se engloban en 4 vueltas o rondas
- Como resultado de estas operaciones, se obtienen cuatro nuevos vectores A'B'C'D' que serán la entrada IV' para el segundo bloque de 512 bits, repitiéndose esto con los restantes bloques de M
- La última salida de IV corresponde al resumen final H = h(M)
- Definido en la RFC 1321: https://tools.ietf.org/html/rfc1321

Esquema de MD5



Bloque principal de MD5

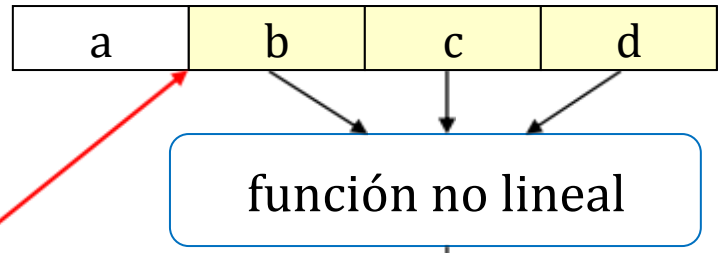


¿Qué son y qué hacen las funciones F, G, H e I?

Funciones F, G, H e I en MD5

Vector inicial ABCD

A_{16} = 01234567
B_{16} = 89ABCDEF
C_{16} = FEDCBA98
D_{16} = 76543210



128 bits

x, y, z ⇒ b, c, d

***F* (x, y, z)**
(x AND y) OR (NOT x AND z)
***G* (x, y, z)**
(x AND z) OR (y AND NOT z)
***H* (x, y, z)**
x XOR y XOR z
***I* (x, y, z)**
y XOR (x OR NOT z)

***F* (b, c, d)**
(b AND c) OR (NOT b AND d)
***G* (b, c, d)**
(b AND d) OR (c AND NOT d)
***H* (b, c, d)**
b XOR c XOR d
***I* (b, c, d)**
c XOR (b OR NOT d)

Funcionamiento de MD5

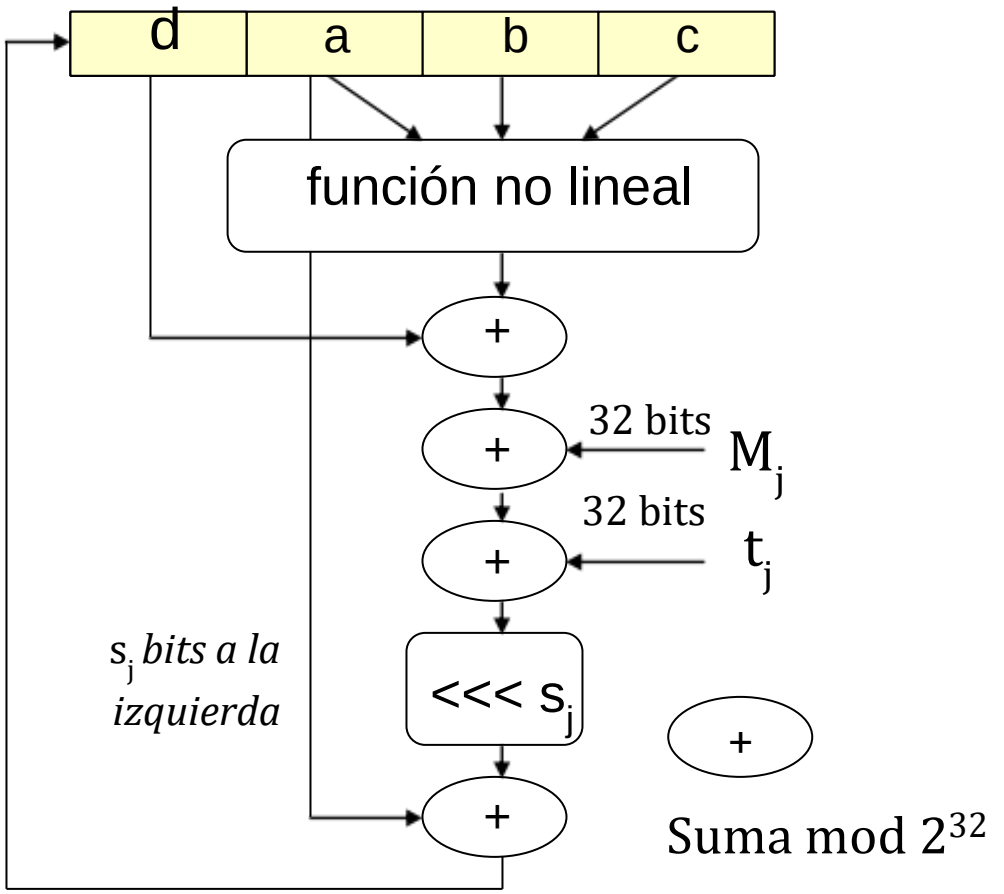
Desplazamiento del registro →

Situación luego del desplazamiento

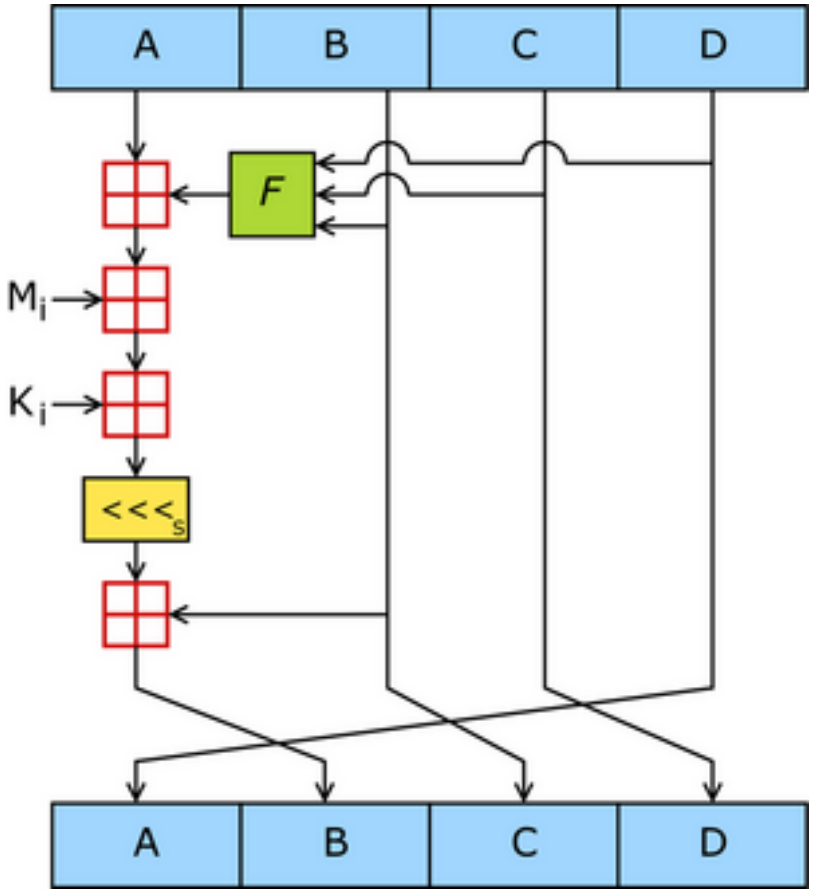
Se repite el proceso para M_{j+1} hasta 16 bloques del texto. En las vueltas 2, 3 y 4 se repite el proceso ahora con funciones G, H e I

El algoritmo realiza 4*16 = 64

vueltas o rondas para cada uno de los bloques de 512 bits de M



Funciones en cada vuelta de MD5



A = 01234567 B = 89ABCDEF C = FEDCBA98 D = 76543210

Dependiendo de la ronda, **F** puede ser F, G, H, I:

F = (**B** AND **C**) OR (NOT **B** AND **D**) 1ª ronda

G = (**B** AND **D**) OR (**C** AND NOT **D**) 2ª ronda

H = (**B** XOR **C** XOR **D**) 3ª ronda

I = (**C** XOR (**B** OR NOT **D**)) 4ª ronda

□ es una suma mod 2^{32}, no un XOR

- Funciones en cada una de las 4 vueltas o rondas
- FF (a,b,c,d,Mj,tj,s) a = b + ((a + F (b,c,d) + Mj + tj) <<< s)
- GG (a,b,c,d,Mj,tj,s) a = b + ((a + G (b,c,d) + Mj + tj) <<< s)
- HH (a,b,c,d,Mj,tj,s) a = b + ((a + H (b,c,d) + Mj + tj) <<< s)
- II (a,b,c,d,Mj,tj,s) a = b + ((a + I (b,c,d) + Mj + tj) <<< s)

Operaciones en 1ª y 2ª vueltas de MD5

Primera vuelta

FF (a, b, c, d, M_j, t_j, s_j)

FF(a, b, c, d, M_0, D76AA478, 7)
FF(d, a, b, c, M_1, E8C7B756, 12)
FF(c, d, a, b, M_2, 242070DB, 17)
FF(b, c, d, a, M_3, C1BDCEEE, 22)
FF(a, b, c, d, M_4, F57C0FAF, 7)
FF(d, a, b, c, M_5, 4787C62A, 12)
FF(c, d, a, b, M_6, A8304613, 17)
FF(b, c, d, a, M_7, FD469501, 22)
FF(a, b, c, d, M_8, 698098D8, 7)
FF(d, a, b, c, M_9, 8B44F7AF, 12)
FF(c, d, a, b, M_{10}, FFFF5BB1, 17)
FF(b, c, d, a, M_{11}, 895CD7BE, 22)
FF(a, b, c, d, M_{12}, 6B901122, 7)
FF(d, a, b, c, M_{13}, FD987193, 12)
FF(c, d, a, b, M_{14}, A679438E, 17)
FF(b, c, d, a, M_{15}, 49B40821, 22)

Segunda vuelta

GG (a, b, c, d, M_j, t_j, s_j)

GG(a, b, c, d, M_1, F61E2562, 5)
GG(d, a, b, c, M_6, C040B340, 9)
GG(c, d, a, b, M_{11}, 265E5A51, 14)
GG(b, c, d, a, M_0, E9B6C7AA, 20)
GG(a, b, c, d, M_5, D62F105D, 5)
GG(d, a, b, c, M_{10}, 02441453, 9)
GG(c, d, a, b, M_{15}, D8A1E681, 14)
GG(b, c, d, a, M_4, E7D3FBC8, 20)
GG(a, b, c, d, M_9, 21E1CDE6, 5)
GG(d, a, b, c, M_{14}, C33707D6, 9)
GG(c, d, a, b, M_3, F4D50D87, 14)
GG(b, c, d, a, M_8, 455A14ED, 20)
GG(a, b, c, d, M_{13}, A9E3E905, 5)
GG(d, a, b, c, M_2, FCEFA3F8, 9)
GG(c, d, a, b, M_7, 676F02D9, 14)
GG(b, c, d, a, M_{12}, 8D2A4C8A, 20)

Operaciones en 3ª y 4ª vueltas de MD5

Tercera vuelta

HH $(a, b, c, d, M_j, t_j, s_j)$

HH(a, b, c, d, M_5, FFFA3942, 4)
HH(d, a, b, c, M_8, 8771F681, 11)
HH(c, d, a, b, M_{11}, 6D9D6122, 16)
HH(b, c, d, a, M_{14}, FDE5380C, 23)
HH(a, b, c, d, M_1, A4BEEA44, 4)
HH(d, a, b, c, M_4, 4BDECFA9, 11)
HH(c, d, a, b, M_7, F6BB4B60, 16)
HH(b, c, d, a, M_{10}, BEBFBC70, 23)
HH(a, b, c, d, M_{13}, 289B7EC6, 4)
HH(d, a, b, c, M_0, EAA127FA, 11)
HH(c, d, a, b, M_3, D4EF3085, 16)
HH(b, c, d, a, M_6, 04881D05, 23)
HH(a, b, c, d, M_9, D9D4D039, 4)
HH(d, a, b, c, M_{12}, E6DB99E5, 11)
HH(c, d, a, b, M_{15}, 1FA27CF8, 16)
HH(b, c, d, a, M_2, C4AC5665, 23)

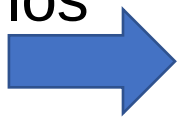
Cuarta vuelta

II $(a, b, c, d, M_j, t_j, s_j)$

II(a, b, c, d, M_0, F4292244, 6)
II(d, a, b, c, M_7, 411AFF97, 10)
II(c, d, a, b, M_{14}, AB9423A7, 15)
II(b, c, d, a, M_5, FC93A039, 21)
II(a, b, c, d, M_{12}, 655B59C3, 6)
II(d, a, b, c, M_3, 8F0CCC92, 10)
II(c, d, a, b, M_{10}, FFEFF47D, 15)
II(b, c, d, a, M_1, 85845DD1, 21)
II(a, b, c, d, M_8, 6FA87E4F, 6)
II(d, a, b, c, M_{15}, FE2CE6E0, 10)
II(c, d, a, b, M_6, A3014314, 15)
II(b, c, d, a, M_{13}, 4E0811A1, 21)
II(a, b, c, d, M_4, F7537E82, 6)
II(d, a, b, c, M_{11}, BD3AF235, 10)
II(c, d, a, b, M_2, 2AD7D2BB, 15)
II(b, c, d, a, M_9, EB86D391, 21)

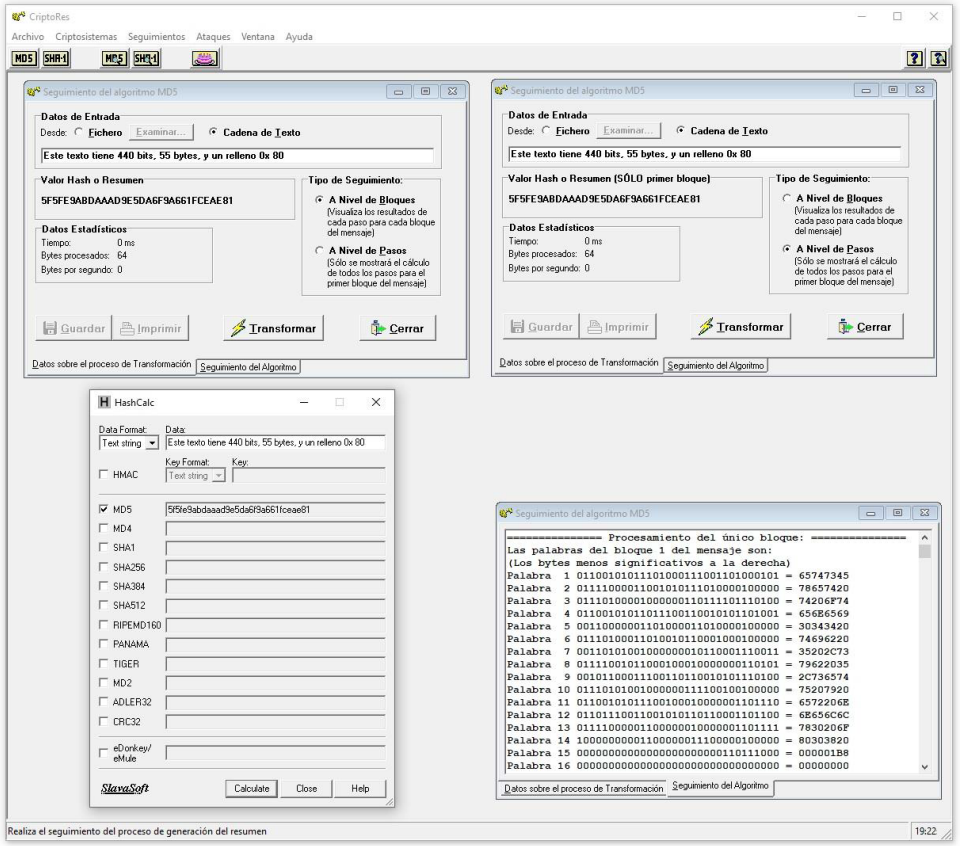
MD5 por dentro

- Mediante la pestaña seguimiento de CriptoRes, podrá observar los bytes de relleno y los 64 bits (dos últimas palabras de 32 bits) reservadas para la longitud del mensaje al final de éste
- Siempre existirá un relleno. Por ejemplo, si no hay entrada, el hash de nulo se calcula sobre el mensaje 0x 80 00 00 00 00 … 00 00 00
- Ejercicios con Criptores
  - Si el mensaje tiene un tamaño de 55 bytes (440 bits), como habrá que reservar los últimos 64 bits para la longitud, se añadirá 1 byte de relleno 0x 80 al primer y único bloque M (55 + 1 + 8 = 64 bytes = 512 bits)
  - Si M tiene 56 bytes (448 bits), entonces se añadirá relleno con 0x 80 y se forzará a que haya un segundo bloque sólo con rellenos, dejando los últimos 64 bits reservados para la longitud del mensaje



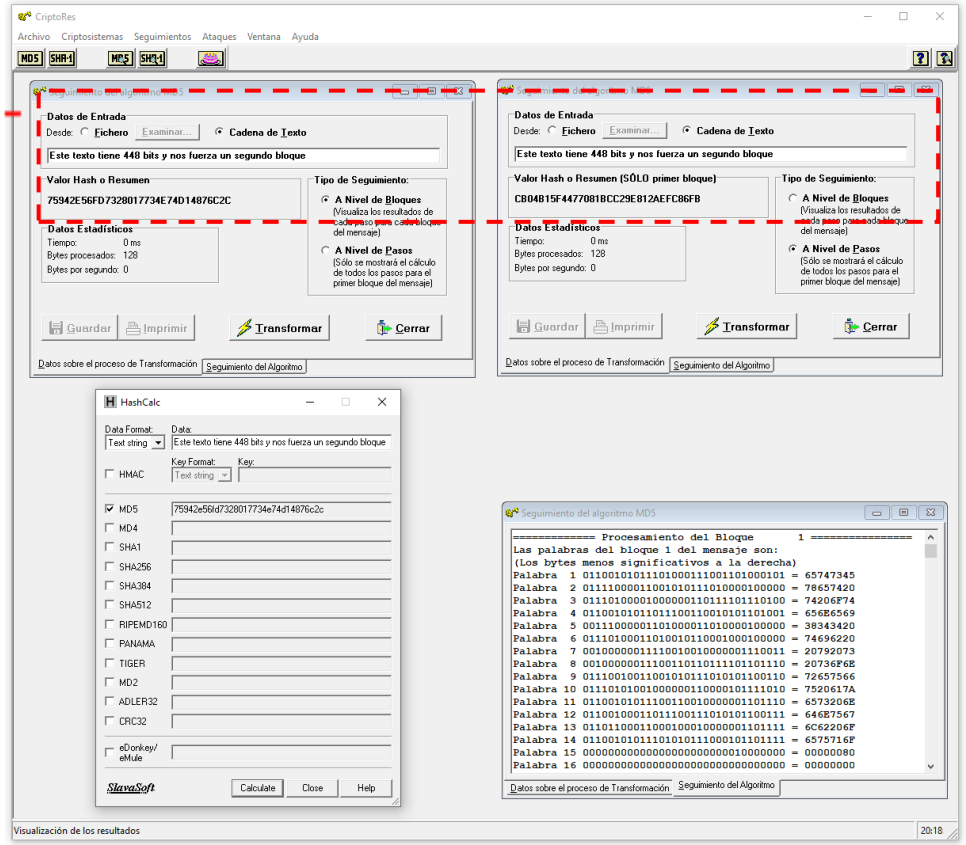
Mínimo relleno 0x 80 en primer bloque

- Vamos a obtener el hash MD5 del texto M con 55 bytes, 440 bits, que se indica
- M = Este texto tiene 440 bits, 55 bytes, y un relleno 0x 80
- h(M) = 5F5FE9ABDAAAD9E5DA6F9A661FCEAE81
- Tenemos un único bloque de 512 – 64 = 448 bits para texto + relleno
- Aparece el texto M en hexadecimal y lectura Little Endian en cada palabra de 32 bits, y al final de la palabra 14 vemos un único byte 0x 80 de relleno
- Por las palabras 15 y 16, la longitud del M es 0x 1B8 = 440 en decimal, los 440 bits del mensaje
- Todo correcto. ¿Qué pasará si añadimos 1 byte?



Forzando rellenos en el segundo bloque

- En este software se ha limitado ver el relleno y la longitud del mensaje solo en el primer bloque
- Vamos a obtener el hash MD5 del texto M con 56 bytes, 448 bits, que se indica
- M = Este texto tiene 448 bits y nos fuerza un segundo bloque
- h(M) = 75942E56FD7328017734E74D14876C2C
- Nos fuerza a que se procesen ahora dos bloques
- El relleno 0x 80 comienza en la palabra 15 del primer bloque, y sigue en todo el segundo bloque con 0x 00 hasta la palabra 14, ya que las palabras 15 y 16 de este segundo último bloque estarán reservadas para indicar la longitud del mensaje M



Hash 1er bloque y hash dos bloques diferentes

Conclusiones

- MD5 usa la construcción de Merkle-Damgård de compresión
- Por lo tanto, divide el mensaje en bloques de 512 bits, incluyendo siempre un relleno de ceros que comienza por 0x 80 y dejando los últimos 64 bits para indicar el tamaño de texto
- Trabaja con 4 vectores iniciales ABCD de 32 bits cada uno que se mezclan con el bloque de 512 bits del mensaje M en 64 vueltas o rondas con las funciones F, G, H e I, con 16 vueltas en cada una
- En cada vuelta, se tomarán 16 palabras diferentes M_j de 32 bits del mensaje M, desde M_0 hasta M_{15}, además de 16 constantes t_j diferentes y unos desplazamientos s_j determinados en una tablas
- MD5 entrega un resumen de 128 bits y hoy no es recomendable su uso

Secure Hash Algorithm SHA y SHA-0

- En 1993, la National Security Agency NSA de los Estados Unidos diseña una función hash de 160 bits, con la idea de que permita sustituir a la función hash MD5 de Ron Rivest (1991) de solo 128 bits
- Además, en ese mismo año 1993 el gobierno USA da inicio al proyecto Capstone para nuevos estándares de criptografía de uso público y gubernamental, impulsado por la propia NSA y el National Institute of Standards and Technology NIST
- En la firma digital Digital Signature Algorithm DSA que se incluye en el proyecto Capstone, es obligatorio usar un hash de 160 bits
- En 1995 la NSA actualiza SHA como SHA-1, justificando que en aquel algoritmo había encontrado debilidades, y pide que pase a llamarse SHA-0 y no se use, sin publicar las razones técnicas que lo han forzado

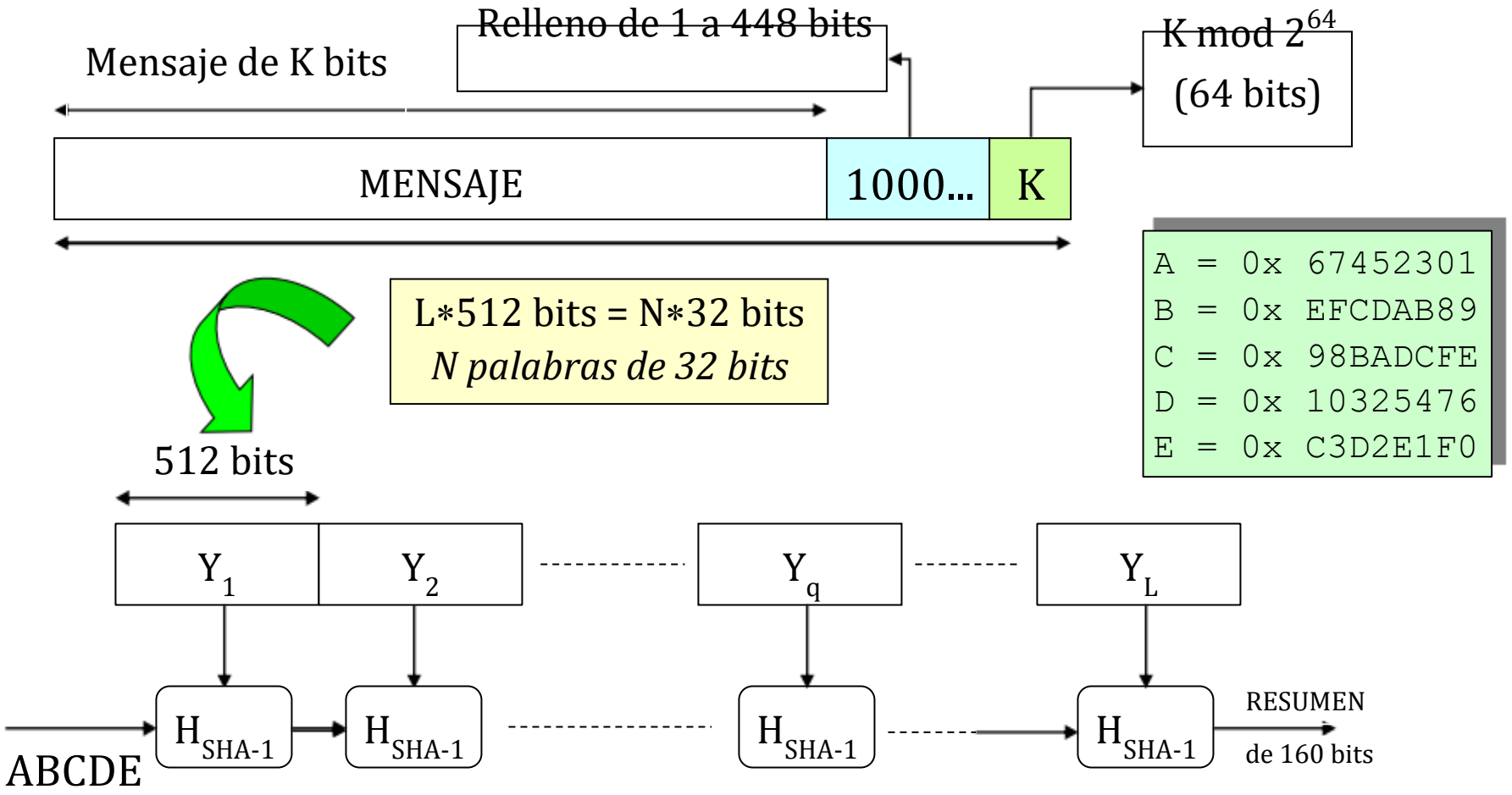
Características de SHA-1 (1/2)

- SHA-1 fue creado por la NSA en 1995 y soluciona las debilidades que mostraba su predecesor SHA o SHA-0 (1993)
- Esta función hash comienza su declive cuando en 2005 MD5 es atacado, debido a que sus operaciones son muy similares
- Procesa bloques de 512 bits con una salida de 160 bits
- Expande el mensaje hasta una longitud 64 bits inferior a un múltiplo de 512 bits
- El relleno se indica con un bit 1 seguido de tantos bits 0 como sean necesarios, reservando los últimos 64 bits del mensaje para añadir información sobre la longitud en bits del mismo

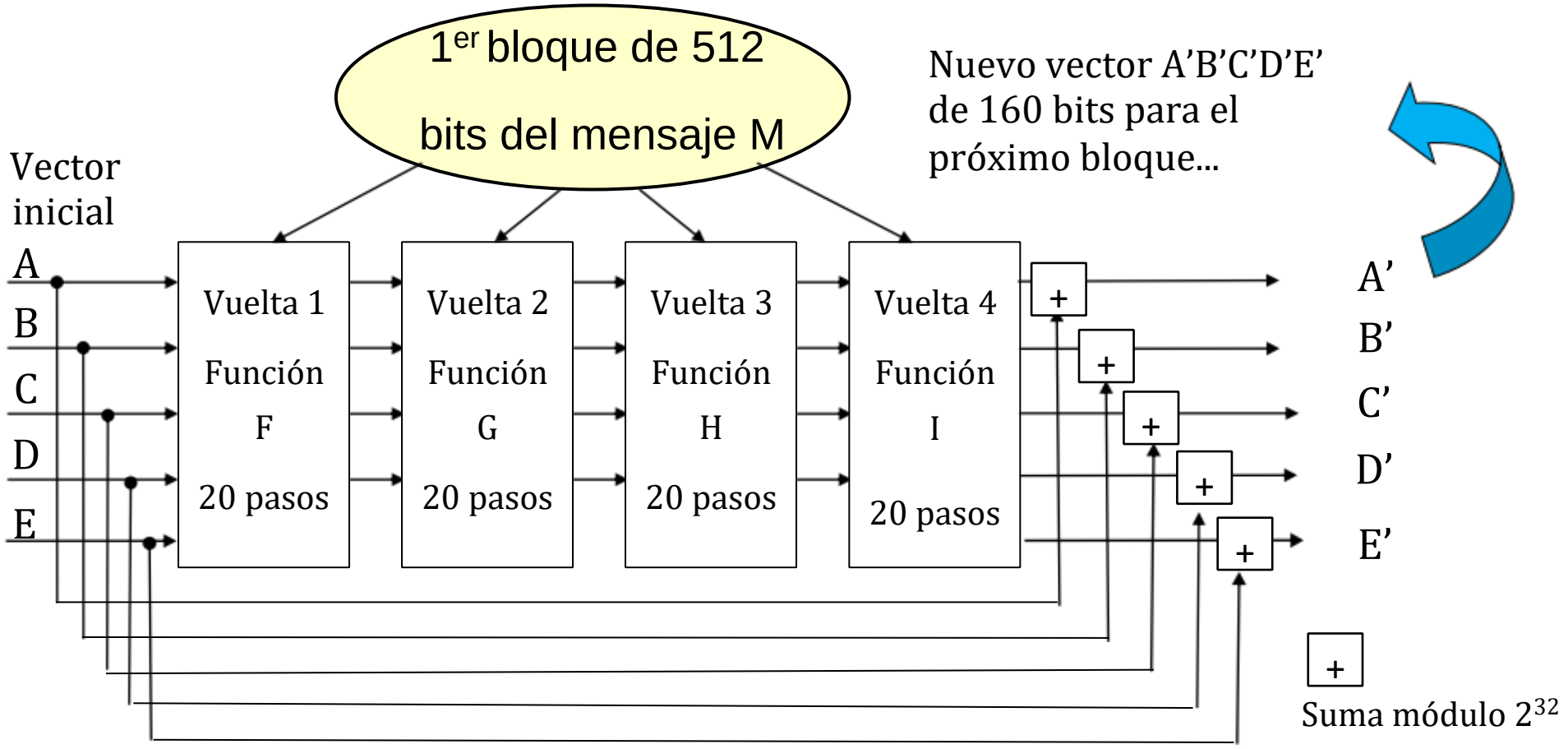
Características de SHA-1 (2/2)

- El algoritmo comienza con 5 vectores iniciales (IV) ABCDE de 32 bits cada uno, cuyo valor inicial no es secreto. A estos vectores y al primer bloque de 512 bits de M se le aplican 80 operaciones de 32 bits con puertas lógicas, cuyo carácter es no lineal
- Las 80 operaciones se engloban en 4 vueltas o rondas F, G, H, I
- Como resultado de estas operaciones, se obtienen cinco nuevos vectores A'B'C'D'E' que serán la entrada IV' para el segundo bloque de 512 bits, repitiéndose este proceso con los restantes bloques de M hasta terminar el mensaje
- La última salida de IV corresponde al resumen final H = h(M)
- RFC 6234: https://tools.ietf.org/html/rfc6234#page-36

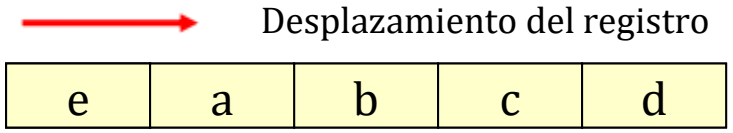
Esquema de SHA-1



Bloque principal de SHA-1



Funciones en vueltas F, G, H e I en SHA-1



- Se realiza el proceso con la función F para las palabras M_0 a M_{15} de 32 bits del primer bloque. Para obtener las palabras M_{16} a M_{19} que faltan, se usará un algoritmo de expansión que veremos más adelante
- En las vueltas 2, 3 y 4 se repite el proceso con funciones G, H e I desde M_{20} hasta M_{79}
- Tenemos 4 vueltas multiplicado por 20 palabras = 80 pasos por cada bloque de 512 bits… pero, ¿cómo es posible sacar 80 palabras diferentes de 32 bits de un bloque de 512 bits y un mensaje M que cuenta solo con 16 palabras?

- F (b, c, d) → pasos t = 0 a 19

(b AND c) OR ((NOT b) AND d)

- G (b, c, d) → pasos t = 20 a 39

b XOR c XOR d

- H (b, c, d) → pasos t = 40 a 59

(b AND c) OR (b AND d) OR (c AND d)

- I (b, c, d) → pasos t = 60 a 79

b XOR c XOR d

Funciones F, G, H e I en SHA-1

Las 80 palabras de SHA-1 en cada vuelta

- Cada bloque de 16 palabras del mensaje (M_0 ... M_{15}) se expandirá a 80 palabras (W_0 ... W_{79}) según el siguiente algoritmo que, cuando se acaban las 16 palabras de 32 bits del mensaje M, genera las otras 64 palabras restantes haciendo una operación lógica xor con palabras anteriores
- Para t = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15
  - $W_t = M_t$
- Para t = 16, 17, 18, 19, 20, 21, ... 74, 75, 76, 77, 78, 79
  - $W_t = (W_{t-3} \oplus W_{t-8} \oplus W_{t-14} \oplus W_{t-16}) <<< 1$

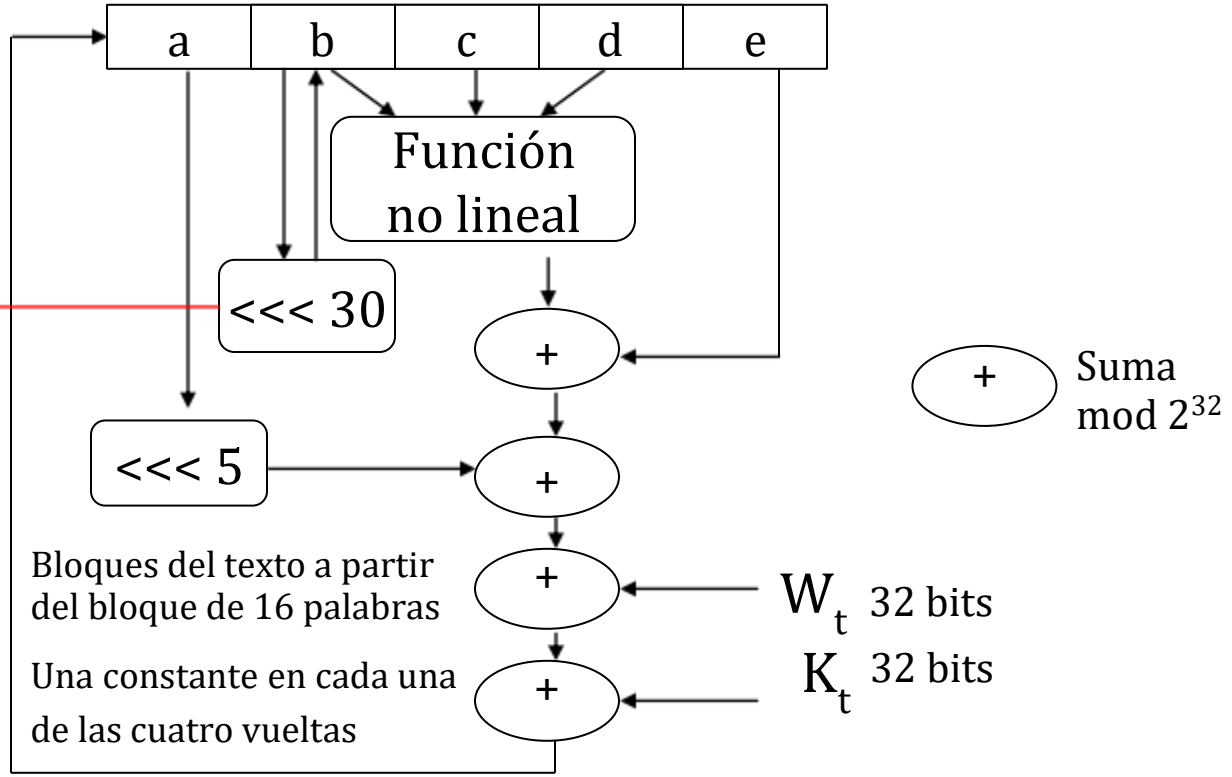
Funcionamiento de SHA-1

Vector de 160 bits

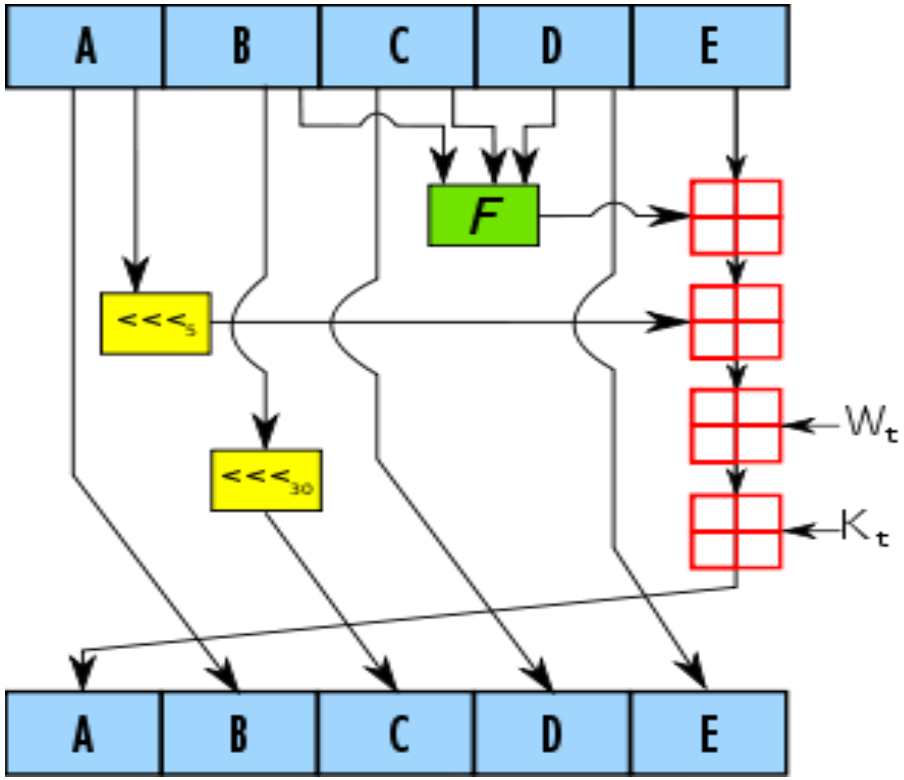
```
A = 0x 67452301
B = 0x EFCDAB89
C = 0x 98BADCFE
D = 0x 10325476
E = 0x C3D2E1F0
```

Después de esta última operación, se produce el desplazamiento del vector hacia la derecha

e	a	c	c	e



Funciones en cada vuelta de SHA-1



A = 67452301 B = EFCDAB89 C = 98BADCFE
D = 10325476 E = C3D2E1F0

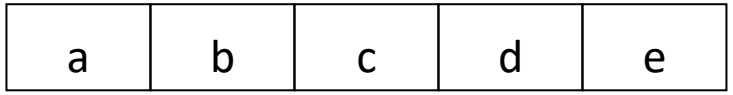
Dependiendo de la ronda, la función ***F*** puede ser F, G, H, I:

F = (**B** AND **C**) OR (NOT **B** AND **D**) 1ª ronda
G = (**B** XOR **C** XOR **D**) 2ª ronda
H = (**B** AND **C**) OR (**B** AND **D**) OR (**C** AND **D**) 3ª Ronda
I = (**B** XOR **C** XOR **D**) 4ª ronda

□ es una suma mod 2^{32}

- K_t = 5A827999 para t = 0, ..., 19
- K_t = 6ED9EBA1 para t = 20, ..., 39
- K_t = 8F1BBCDC para t = 40, ..., 59
- K_t = CA62C1D6 para t = 60, ..., 79

Algoritmo de desplazamiento en cada paso



- Algoritmo de desplazamiento del vector abcde en cada paso

  Para t = 0 hasta 79 hacer

  $TEMP = F_t(b,c,d) + e + (a <<< 5) + W_t + K_t$

  a = e

  e = d

  d = c

  c = b <<< 30

  b = a

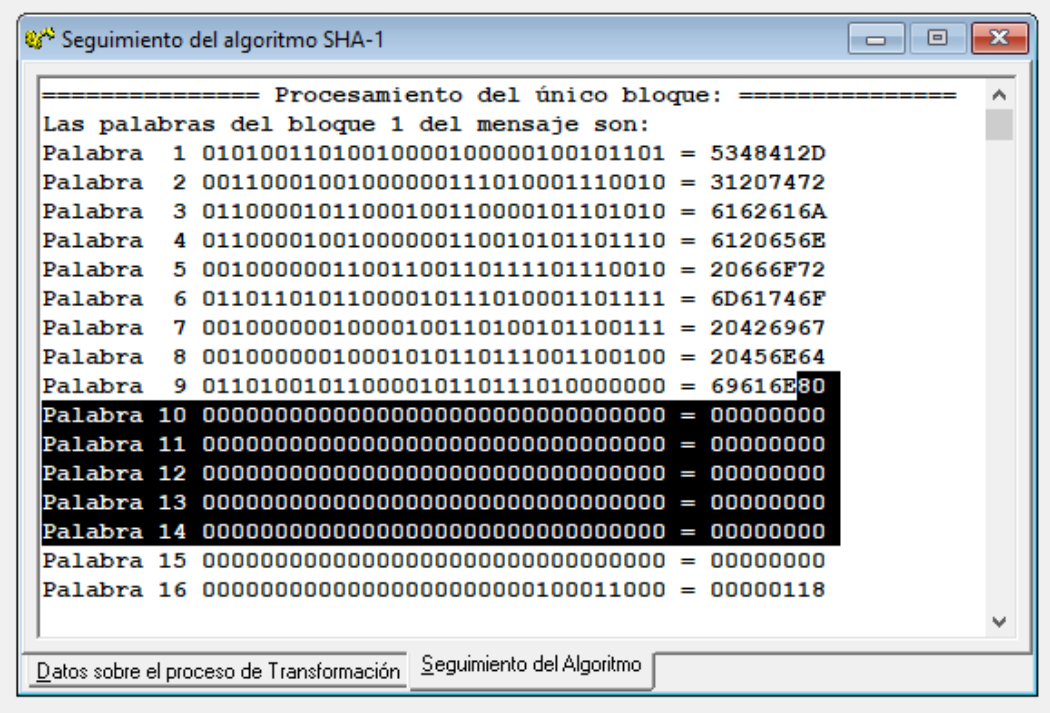
  a = TEMP

SHA-1 por dentro con CriptoRes

- Mediante la pestaña seguimiento de CriptoRes, podrá observar los bytes de relleno y los 64 bits (dos últimas palabras de 32 bits) reservadas para la longitud del mensaje al final de éste
  - Comprobar el relleno y el tamaño del mensaje M de un solo bloque
  - M = SHA-1 trabaja en formato Big Endian
  - Usando operaciones en hexadecimal, calcular cómo queda el vector inicial abcde después del primer desplazamiento o primer paso
- Siempre existirá un relleno. Por ejemplo, si no hay entrada, el hash de nulo se calcula sobre el mensaje 0x 80 00 00 00 00 … 00 00 00
  - $h(\text{vacío})_{\text{SHA-1}}$ = DA39A3EE5E6B4B0D3255BFEF95601890AFD80709

Relleno y tamaño del mensaje

- M = SHA-1 trabaja en formato Big Endian
- $h(M)_{SHA\text{-}1}$ = D66680113B6E804C75B1E9A78F60E5456D6BB965



- Lectura Big Endian
- SHA- = 0x 5348412D
- 1 tr = 0x 31207472
- El relleno comienza en el último byte de la palabra 9 y termina en la palabra 14, en total 168 bits
- Tamaño del mensaje M = 0x 118, 280 bits, es decir, 35 bytes

Cálculos en el primer paso (datos)

- Usando solo la calculadora de Windows en hexadecimal con Dword, palabras de 32 bits, se pide encontrar cómo queda el vector IV después del primer paso o primera operación
- Datos para cálculo de TEMP = $F_t(b,c,d) + e + (a <<< 5) + W_t + K_t$
- a = 67452301 = 01100111010001010010001100000001
- a <<< 5 = 11101000101001000110000000101100 = 0x E8A4602C
- b = EFCDAB89 = 11101111110011011010101110001001
- b <<< 30 = 01111011111100110110101011100010 = 7BF36AE2
- c = 98BADCFE
- d = 10325476
- e = C3D2E1F0
- M_0 = 5348412D (primeros 4 bytes del mensaje M)
- K_t = 5A827999

Vector abcde en t = 0

67452301	EFCDAB89	98BADCFE	10325476	C3D2E1F0

Cálculos en el primer paso (operaciones)

- Calculando $F_t(b,c,d) + e + (a <<< 5) + W_t + K_t$
- $F_t(b,c,d)$ = (b AND c) or (NOT b AND d)
- b AND c = EFCDAB89 AND 98BADCFE = 88888888
- NOT b = NOT EFCDAB89 = 10325476
- NOT b AND d = 10325476 and 10325476 = 10325476
- (b AND c) or (NOT b AND d) = 88888888 or 10325476 = 98BADCFE
- + e 98BADCFE + C3D2E1F0 = 5C8DBEEE
- + (a <<< 5) 5C8DBEEE + E8A4602C = 45321F1A
- + M_0 45321F1A + 5348412D = 987A6047
- + K_t 987A6047 + 5A827999 = F2FCD9E0. Por lo tanto, TEMP = F2FCD9E0

e = d = 10325476
d = c = 98BADCFE
c = b <<< 30 = 7BF36AE2
b = a = 67452301
a = TEMP = F2FCD9E0

67452301	EFCDAB89	98BADCFE	10325476	C3D2E1F0

Vector abcde en t = 0

Vector abcde en t = 1

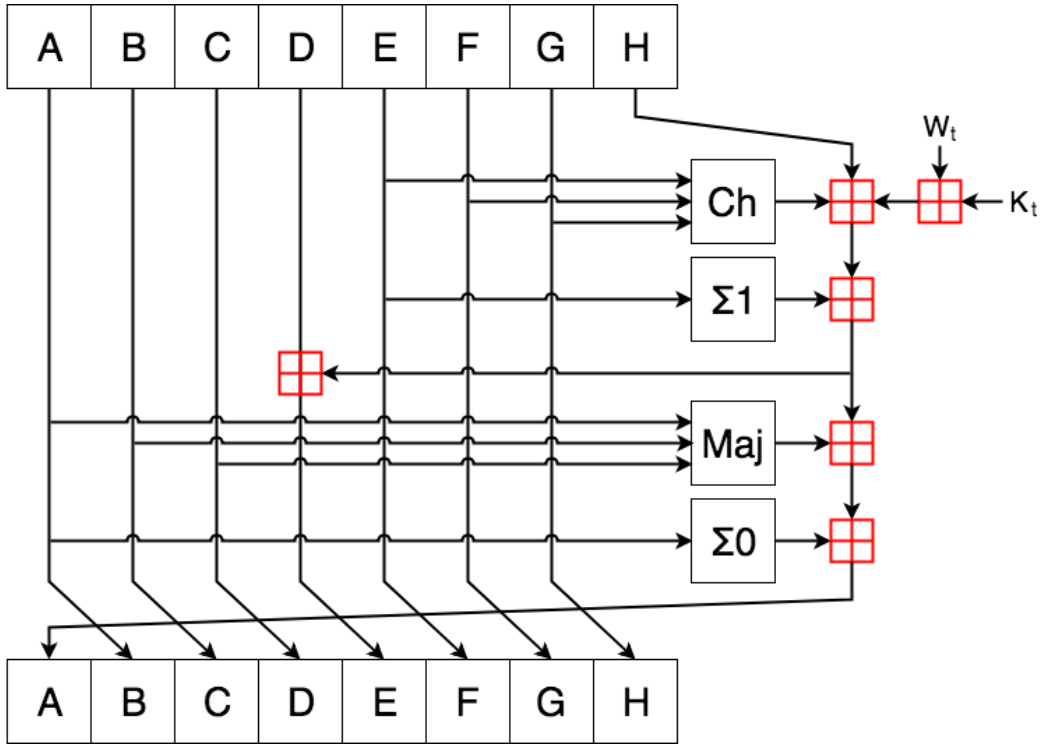
F2FCD9E0	67452301	7BF36AE2	98BADCFE	10325476

Características de la familia SHA-2

- A la vista de futuras vulnerabilidades en SHA-1, la NSA crea en 2001 una familia de hashes conocida como SHA-2
- SHA-2 entrega resúmenes de 224, 256, 384 y 512 bits
- El SHA-224 es el SHA-256 truncado a los 224 bits de la derecha
- El SHA-384 es el SHA-512 truncado a los 384 bits de la derecha
- SHA-256 y su variante SHA-224 emplean palabras de 32 bits
- SHA-512 y su variante SHA-384 emplean palabras de 64 bits
- Las variantes SHA-512/224 y SHA-512/256 son recomendadas en vez de SHA-224 y SHA-256, al estar basadas en SHA-512 y tener mayor resistencia a los ataques por extensión de longitud

Esquema genérico de la función SHA-2

- SHA-256
  - Bloques de 512 bits, con 64 vueltas, vectores y palabras de 32 bits, suma mod 2^{32} y un mensaje máximo de 2^{64}-1 bits
- SHA-512
  - Bloques de 1.024 bits, con 80 vueltas, vectores y palabras de 64 bits, suma mod 2^{64} y un mensaje máximo de 2^{128}-1 bits



- Ch (Choose) y Maj (Majority): son operaciones lógicas AND y XOR
- Σ1 y Σ0: XOR repetido sobre el mismo registro con tres desplazamientos

Datos y operaciones en SHA-256

- Vector de inicio (32 bits parte decimal de la raíz cuadrada primos [2, 19])
  - A = 6a09e667 B = bb67ae85 C = 3c6ef372 D = a54ff53a
  - E = 510e527f F = 9b05688c G = 1f83d9ab H = 5be0cd19
- Terminadas las 16 palabras W_t de 32 bits del bloque (16*32 = 512), se extienden a un total de 64 palabras (para los 64 pasos de cada bloque) haciendo operaciones XOR, rotaciones y desplazamiento de palabras anteriores
- K_t es una constante de 32 bits basada en los primeros 64 primos en [2, 311]
- Ch (E , F , G) = (E AND F) XOR (NOT E AND G)
- Maj (A , B , C) = (A AND B) XOR (A AND C) XOR (B AND C)
- Σ_0 (A) = (A ⋙ 2) XOR (A ⋙ 13) XOR (A ⋙ 22)
- Σ_1 (E) = (E ⋙ 6) XOR (E ⋙ 11) XOR (E ⋙ 25)

Datos y operaciones en SHA-512

- Vector de inicio (64 bits parte decimal de la raíz cuadrada primos [2, 19])
  - A = 6a09e667f3bcc908 B = bb67ae8584caa73b C = 3c6ef372fe94f82b
  - D = a54ff53a5f1d36f1 E = 510e527fade682d1 F = 9b05688c2b3e6c1f
  - G = 1f83d9abfb41bd6b H = 5be0cd19137e2179
- Terminadas las 16 palabras W_t de 64 bits del bloque (16*64 = 1.024), se extienden a un total de 80 palabras (para los 80 pasos de cada bloque) haciendo operaciones XOR, rotaciones y desplazamiento de palabras anteriores
- K_t es una constante de 64 bits basada en los primeros 80 primos en [2, 409]
- Ch (E , F , G) = (E AND F) XOR (NOT E AND G)
- Maj (A , B , C) = (A AND B) XOR (A AND C) XOR (B AND C)
- Σ_0 (A) = (A ⋙ 28) XOR (A ⋙ 34) XOR (A ⋙ 39)
- Σ_1 (E) = (E ⋙ 14) XOR (E ⋙ 18) XOR (E ⋙ 41)

Resumen características familia SHA-2

Algoritmo y variante		Tamaño del hash (bits)	Longitud de la palabra (bits)	Tamaño del bloque (bits)	Vueltas	Tamaño del vector interno (bits)	Tamaño máximo del mensaje (bits)
SHA-2	*SHA-224*	224	32	512	64	256 (8 x 32)	$2^{64} - 1$
	SHA-256	256					
	SHA-384	384	64	1.024	80	512 (8 x 64)	$2^{128} - 1$
	SHA-512	512					
	SHA-512/224	224					
	SHA-512/256	256					

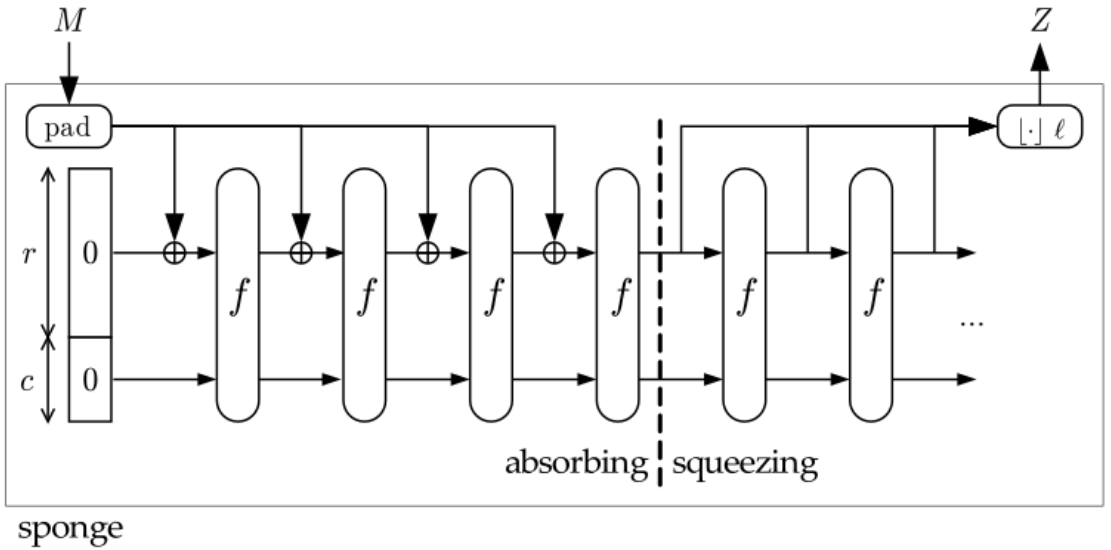
- Los ataques de preimagen o colisiones actuales sólo afectan a un número concreto de vueltas de SHA-2, inferior al total empleado realmente
- A fecha de hoy, mayo de 2021, SHA-256 sigue siendo el algoritmo de hash de referencia implantado en navegadores web (https), software de correo electrónico, aplicaciones, tarjetas inteligentes, etc.

El NIST busca un nuevo estándar de hash

- Ante los ataques recibidos por MD5 y la consiguiente alarma mostrada por expertos mundiales con los hashes de construcción Merkle-Damgård, el NIST publica una nota de prensa el 23 de enero 2007 con el borrador de la llamada a concurso para encontrar el nuevo estándar de hash SHA-3
- Tres años después, en diciembre de 2010, el NIST selecciona en la tercera ronda a cinco finalistas: BLAKE, Ghøstl, JH, Keccak y Skein
- En octubre de 2012, el NIST anuncia que el ganador es Keccak, desarrollado por los investigadores belgas Joan Daemen, Michael Peeters, Gilles Van Assche y el italiano Guido Bertoni
- Los autores publican en el NIST el estándar de hash en febrero de 2013
- SHA-3 es publicado como estándar oficial por el NIST en agosto de 2015

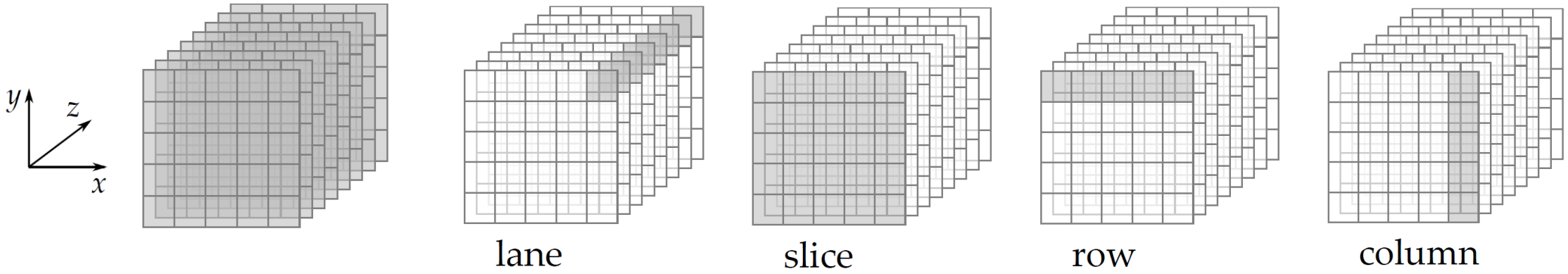
Construcción esponja

- Construcción esponja: función F(M) = h(M) para hash SHA-3
  - Entrada de longitud variable y salida de longitud variable
  - Permutación (o transformación) f de longitud fija
  - Número de bits o estado = b, donde b = r + c (r bloque o *rate* y c *capacity*)
- Bloques M + relleno
  - Bloques de r bits
  - S = estado (b bits)
  - Inicializado a cero
- Fase de absorción (entrada)
- Fase de exprimido (salida)



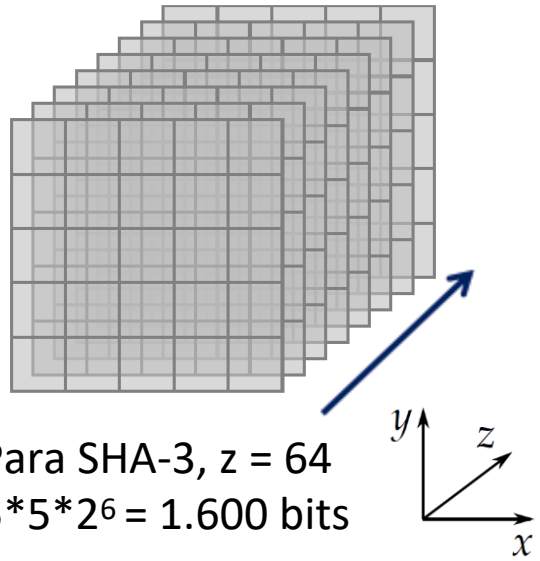
sponge

Estados de Keccak



- En cada celda puede haber un solo bit
- Rebanadas o caras (slice) cada una con 5x5 = 25 bits
- 5*5 carriles o pistas (lane) cada uno con 2^L bits (L = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6)
- La función *f* contempla 5 operaciones sobre bits en las tres dimensiones x, y, z (XOR, AND, NOT) conocidas como θ (theta), ρ (rho), π (pi), χ (chi) y ι (iota) con un número de vueltas igual a 12 + 2*L
- En los ejes x, y las operaciones serán en mod 5 y en el eje z en mod 2^L

SHA-3



Para SHA-3, z = 64
$5*5*2^6 = 1.600$ bits

- Usaremos 64 carriles (L = 6, $2^L = 2^6 = 64$) por lo que se trabajará en un estado con $5*5*2^6 = 1.600$ bits
- Los valores de bloque r a tratar vendrán dados por el hash que se desee, que por compatibilidad con SHA-2 serán 224, 256, 384 y 512 bits
- Como el bloque r será mayor que el hash deseado, como hash se eligen los primeros n bits de esos r bits

- La capacidad determina la seguridad del esquema
- La seguridad ante los colisiones por paradoja del cumpleaños será n/2

Salida bits SHA-3	b (bits con L = 64)	r (rate/bloque)	c (capacity)
n = 224	1.600	1.152	448
n = 256	1.600	1.088	512
n = 384	1.600	832	768
n = 512	1.600	576	1.024

Resumen SHA-3

Instance	Output size *d*	Rate *r* = block size	Capacity *c*	Definition	Security strengths in bits		
					Collision	Preimage	2nd preimage
SHA3-224(*M*)	224	1152	448	Keccak[448](*M* || 01, 224)	112	224	224
SHA3-256(*M*)	256	1088	512	Keccak[512](*M* || 01, 256)	128	256	256
SHA3-384(*M*)	384	832	768	Keccak[768](*M* || 01, 384)	192	384	384
SHA3-512(*M*)	512	576	1024	Keccak[1024](*M* || 01, 512)	256	512	512

- La capacidad c no se ve afectada por la entrada/salida
- El NIST sugiere en 2013 bajar los valores de la capacidad c, que dan fortaleza al hash ante ataques, pero ante la oposición de la comunidad científica, ratifica los valores originales de sus autores, que son los mostrados en la figura
- El nivel máximo de seguridad del hash será la mitad de esa capacidad c/2

Velocidad MD5, SHA-1, SHA-256, SHA-512

- C:\Program Files\OpenSSL-Win64\bin>openssl speed md5 sha1 sha256 sha512

- Doing md5 for 3s on 16 size blocks: 26531121 md5's in 3.02s… etc.
- Doing sha1 for 3s on 16 size blocks: 26633058 sha1's in 3.00s… etc.
- Doing sha256 for 3s on 16 size blocks: 16162872 sha256's in 2.95s… etc.
- Doing sha512 for 3s on 16 size blocks: 11840646 sha512's in 3.02s… etc.
- OpenSSL 1.1.1k 25 Mar 2021
- built on: Fri Mar 26 01:21:29 2021 UTC
- The 'numbers' are in 1000s of bytes per second processed.

type	16 bytes	64 bytes	256 bytes	1024 bytes	8192 bytes	16384 bytes	
md5	140766.15k	332584.57k	586496.01k	728391.68k	780781.64k	784057.76k	(2º)
sha1	142042.98k	347354.42k	719203.61k	983454.72k	1088995.07k	1106036.86k	(1º)
sha256	87570.27k	198132.86k	379088.27k	475598.15k	516243.46k	517067.49k	(4º)
sha512	62822.91k	253749.43k	430817.53k	649378.91k	762947.70k	772795.08k	(3º)

- SHA-3 es más lento que SHA-2, ver siguiente diapositiva

Resumen características de funciones hash

Algorithm and variant		Output size (bits)	Internal state size (bits)	Block size (bits)	Rounds	Operations	Security against collision attacks (bits)	Security against length extension attacks (bits)	Performance on Skylake (median cpb)		First published
									Long messages	8 bytes	
MD5 (as reference)		128	128 (4 × 32)	512	64	And, Xor, Rot, Add (mod 2^{32}), Or	≤ 18 (collisions found)	0	4.99	55.00	1992
SHA-0		160	160 (5 × 32)	512	80	And, Xor, Rot, Add (mod 2^{32}), Or	< 34 (collisions found)	0	≈ SHA-1	≈ SHA-1	1993
SHA-1							< 63 (collisions found)		3.47	52.00	1995
SHA-2	SHA-224	224	256 (8 × 32)	512	64	And, Xor, Rot, Add (mod 2^{32}), Or, Shr	112	32	7.62	84.50	2004
	SHA-256	256					128	0	7.63	85.25	2001
	SHA-384	384	512 (8 × 64)	1024	80	And, Xor, Rot, Add (mod 2^{64}), Or, Shr	192	128 (≤ 384)	5.12	135.75	2001
	SHA-512	512					256	0	5.06	135.50	
	SHA-512/224	224					112	288	≈ SHA-384	≈ SHA-384	2012
	SHA-512/256	256					128	256			
SHA-3	SHA3-224	224	1600 (5 × 5 × 64)	1152	24	And, Xor, Rot, Not	112	448	8.12	154.25	2015
	SHA3-256	256		1088			128	512	8.59	155.50	
	SHA3-384	384		832			192	768	11.06	164.00	
	SHA3-512	512		576			256	1024	15.88	164.00	
	SHAKE128	d (arbitrary)		1344			min(d/2, 128)	256	7.08	155.25	
	SHAKE256	d (arbitrary)		1088			min(d/2, 256)	512	8.59	155.50	