

Seguridad de la información en la red basada en el sistema de criptografía AES

Kevin Alejandro Herrera
Escuela de Matemática y Ciencias de la Computación
Universidad Nacional Autónoma de Honduras
e-mail: kherrerar@unah.hn

ÍNDICE

I.	Introducción	2
II.	Planteamiento del problema	2
III.	Preliminares y Notación	2
III-A.	Entradas y salidas	2
III-B.	Bytes	2
III-C.	Matriz de estado	2
III-D.	Operaciones matemáticas	2
III-D1.	Suma (o resta)	2
III-D2.	Multiplicación	3
IV.	Seguridad Informática	3
V.	Historia de la criptografía	3
VI.	Advanced Encryption Standard (AES)	4
VI-A.	Estructura del algoritmo	4
VI-B.	Cifrado AES	4
VI-B1.	SubBytes()	4
VI-B2.	ShiftRows()	4
VI-B3.	MixColumns()	4
VI-B4.	AddRoundKey()	5
VI-C.	Cifrado inverso AES	5
VI-C1.	InvSubBytes()	5
VI-C2.	Transformación InvShiftRows()	6
VI-C3.	Transformación InvMixColumns()	6
VI-C4.	Transformación AddRoundKey()	6
VII.	Resultados	6
VIII.	Conclusiones	6
IX.	Trabajo a futuro	6
	Referencias	6

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Tríada de la CIA	3
2.	Origen de la criptografía.	4
3.	Transformación SubBytes	4
4.	Transformación ShiftRows	4
5.	Transformación MixColumns	5
6.	Transformación AddRoundKey	5
7.	Proceso de cifrado AES	5
8.	Transformación InvShiftRows	6
9.	Proceso de cifrado inverso AES	6

ÍNDICE DE CUADROS

I.	Notación hexadecimal	2
II.	Operación XOR.	3
III.	Número de rondas en función de la longitud de la llave	4
IV.	S-box	4
V.	InvS-box	5

Seguridad de la información en la red basada en el sistema de criptografía AES

Resumen—Será escrito al terminar el proyecto de investigación

Palabras claves: AES, criptografía, seguridad de la información, cifrado.

I. INTRODUCCIÓN

Será escrito al terminar el proyecto de investigación

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El avance tecnológico con el pasar del tiempo ha crecido de manera exponencial, con ello el flujo de información en la red ha aumentado su volumen, por tanto muchos de estos datos se encuentran vulnerables al no tener un sistema de seguridad adecuado que pueda resguardar dichos datos, estos mismos pertenecen a organizaciones, empresas o personas de interés.

A medida avanza la tecnología para bien también avanza para mal y muchos de estos sistemas quedan obsoletos ante ataques cada vez indefendibles, para ello se debe implementar un método de seguridad informática; la criptografía en sus diferentes sistemas ayudará de manera eficiente a proteger esta información.

En particular el cifrado simétrico preserva la confidencialidad tanto en las transmisiones de información como en su almacenamiento, protegiendo los archivos y evitando que personas ajenas tengan acceso a la información.

III. PRELIMINARES Y NOTACIÓN

III-A. Entradas y salidas

La salida y entrada del algoritmo AES consiste en una secuencia de *128 bits* (dígitos con valores de 0 o 1). Estas secuencias a veces se denominarán *bloques* y el número de los bits que contienen se denominarán *longitud*.

III-B. Bytes

Definición 1 (Byte): Es una cadena de 8 *bits*, representados como $\{b_7, b_6, b_5, b_4, b_3, b_2, b_1, b_0\}$, estos toman el valor de 0 o 1. Es la unidad básica de procesamiento del algoritmo AES.

La principal y básica estructura algebraica usada en el sistema AES es el campo binario de Galois $GF(2)$ (llamados *bits*). Por tanto un *byte* se puede representar en un campo finito $GF(2^8)$ utilizando una representación polinomial a través de la fórmula:

$$\sum_{i=0}^7 b_i x^i$$

En el algoritmo AES trataremos a los *bytes* en notación hexadecimal, como se puede ver en el cuadro I.

Cadena de bits	Carácter hexadecimal
0000	0
0001	1
0010	2
0011	3
0100	4
0101	5
0110	6
1000	8
1001	9
1010	A
1011	B
1100	C
1101	D
1110	E
1111	F

Cuadro I
NOTACIÓN HEXADECIMAL

III-C. Matriz de estado

El algoritmo AES divide los datos de entrada en bloques de 4 palabras de 32 *bits*, decir $4 \times 32 = 128$ *bits*, se puede ver como una sucesión de 16 *bytes*.

Para comprender las operaciones que se realizan en AES, representaremos los 16 *bytes* como una matriz de 4×4 (cuatro filas por cuatro columnas) llamada **matriz de estado**. Un *byte* se representara por la letra *B* por tanto nuestra matriz de estado será la siguiente:

$$\begin{bmatrix} B_{15} & B_{14} & B_{13} & B_{12} \\ B_{11} & B_{10} & B_9 & B_8 \\ B_7 & B_6 & B_5 & B_4 \\ B_3 & B_2 & B_1 & B_0 \end{bmatrix}$$

III-D. Operaciones matemáticas

Todos los bytes en el algoritmo de AES son interpretados como elementos de un campo finito, estos elementos pueden sumarse y multiplicarse, pero estas operaciones son diferentes a las que se utilizan con los números usuales. A continuación se detallan.

III-D1. Suma (o resta): La suma y resta se caracteriza por tener el mismo resultado y está dado por el operador lógico *or* exclusivo (XOR) bit a bit (ver cuadro II). Esta operación se representa por el símbolo \oplus .

Ejemplo 1: Consideremos $\{01011011\}$ y $\{11010110\}$

- $01011011 \oplus 11010110 = 10001101$ (Notación binaria)
- $5B \oplus D6 = 8D$ (Notación hexadecimal)
- $(x^6 + x^4 + x^3 + x + 1) \oplus (x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + x) = x^7 + x^3 + x^2 + 1$ (Notación polinómica)

A	B	A \oplus B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Cuadro II
OPERACIÓN XOR.

Algoritmo 1 Algoritmo de la suma en $GF(2^8)$

Entrada: $f(x) = \sum_{i=0}^7 a_i x^i$, $g(x) = \sum_{i=0}^7 b_i x^i \in GF(2^8)$

Salida: $h(x) = \sum_{i=0}^7 c_i x^i \in GF(2^8)$

- 1: **para** $i = 0$ hasta 7 **hacer**
 - 2: $c_i \rightarrow (a_i + b_i) \bmod 2$
 - 3: **fin para**
-

III-D2. Multiplicación: : Se calcula como el residuo de la multiplicación binaria de dos componentes, teniendo en cuenta la suma y resta en campo finito, con el polinomio irreducible¹ dado por:

$$m(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x + 1$$

Esta operación se denota por el símbolo \bullet .

Para multiplicar dos *bytes* se escribirán en forma polinómica, teniendo en cuenta que la suma es equivalente a una operación XOR. Al realizar la multiplicación es probable que se tenga un resultado de más de 8 *bits* por tanto se necesitará hacer modulo de dicho polinomio con el polinomio irreducible $m(x)$ para así volver a tener 1 *byte*.

Ejemplo 2: Consideremos $\{01010111\} \bullet \{10000011\}$

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

Evidentemente este nuevo polinomio no contiene 8 *bits*, entonces:

$$\begin{aligned} & x^{13} + x^{11} + x^9 + x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + 1 \bmod x^8 + x^4 + x^3 + x + 1 \\ & = x^7 + x^6 + 1 \end{aligned}$$

que corresponde a 11000001.

Algoritmo 2 Algoritmo de la multiplicación en $GF(2^8)$

Entrada: $f(x) = \sum_{i=0}^7 a_i x^i$, $g(x) = \sum_{i=0}^7 b_i x^i \in GF(2^8)$

Salida: $h(x) = \sum_{i=0}^7 c_i x^i \in GF(2^8)$

- 1: $c \leftarrow 0$
 - 2: **para** $i = 0$ hasta 7 **hacer**
 - 3: $c_i \leftarrow b_i f(x) + c$
 - 4: $f(x) \leftarrow f(x)(x^i) \bmod m(x)$
 - 5: **fin para**
-

IV. SEGURIDAD INFORMÁTICA

Definición 2 (Seguridad de la información): Conjunto de medidas preventivas de las organizaciones que permiten resguardar y proteger la información buscando mantener la confidencialidad, disponibilidad e integridad de la misma.

¹Un polinomio es irreducible si sus únicos divisores son el mismo y la unidad.

Esta seguridad busca la preservación de tres pilares:

- La *confidencialidad* es el principio que garantiza que la información solo puede ser accedida por las personas que tienen autorización.
- La *integridad* es que la información sólo puede ser creada y modificada por quien esté autorizado a hacerlo.
- La *disponibilidad* es que la información debe ser accesible para su consulta o modificación cuando se requiera.

Estos tres conceptos forman lo que a menudo se denomina la triada CIA. Los tres conceptos encarnan los objetivos fundamentales de seguridad tanto para los datos como para la información y los servicios informáticos.



Figura 1. Triada de la CIA

Definición 3 (Seguridad informática): Conjunto de políticas y mecanismos que nos permiten garantizar la confidencialidad, la integridad y la disponibilidad de los recursos en un sistema.

Observación: El concepto de *seguridad de la información* no debe ser confundido con el de *seguridad informática*, ya que este último sólo se encarga de la seguridad en el medio informático. Sin embargo, la información puede encontrarse en diferentes medios o formas, y no solo en medios informáticos. Es decir que el primer concepto es mas amplio que el segundo.

V. HISTORIA DE LA CRIPTOGRAFÍA

La palabra *criptografía* proviene en un sentido etimológico del griego Kriptos = ocultar, Graphos = escritura, lo que significaría escritura oculta.

En su clasificación dentro de las ciencias, la *criptografía* proviene de una rama de las matemáticas como se muestra en la figura 2 que fue iniciada por el matemático Claude Shannon ². en 1948, denominada: Teoría de la información.

Definición 4 (Criptografía): Ciencia encargada de diseñar funciones o dispositivos, capaces de transformar mensajes legibles a mensajes cifrados de tal manera que esta transformación (cifrar) y su transformación inversa (descifrar) sólo pueden ser factibles con el conocimiento de una o mas llaves.

Definición 5 (Criptoanálisis): Ciencia que estudia los métodos que se utilizan para descifrar mensajes sin necesidad

²Claude Elwood Shannon fue un matemático, ingeniero eléctrico y criptógrafo estadounidense recordado como el padre de la teoría de la información

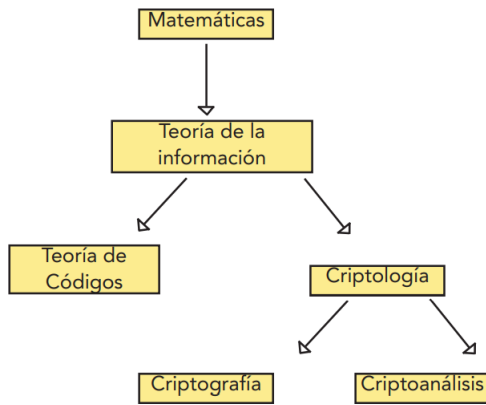


Figura 2. Origen de la criptografía.

de tener la llave con la que dicho mensaje fue cifrado.

La *criptografía* se puede clasificar en dos:

- La criptografía clásica
- La criptografía moderna

VI. ADVANCED ENCRYPTION STANDARD (AES)

VI-A. Estructura del algoritmo

La estructura de este algoritmo consiste en una serie de rondas donde se realizan un conjunto de cuatro transformaciones orientadas a *bytes*, el número de rondas depende de la longitud de la llave.

Vamos a asumir que la longitud de la llave escogida es de 128 *bits* ya que la longitud de la llave no afecta a las diversas transformaciones que realiza el cifrado.

	Longitud de llave (<i>Nk words</i>)	Tamaño de bloque (<i>Nb words</i>)	Número de rondas (<i>Nr</i>)
AES-128	4	4	10
AES-192	6	4	12
AES-256	8	4	14

Cuadro III

NÚMERO DE RONDAS EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD DE LA LLAVE

Básicamente se aplican cuatro transformaciones a la matriz de estado durante el número determinado de rondas, las cuales se detallaran a continuación.

VI-B. Cifrado AES

Para definir este proceso, vamos a asumir que la longitud de la llave es de 128 *bits*, ya que la longitud de la llave no afecta a las transformaciones que realiza el cifrado.

En el proceso de cifrado se aplican cuatro transformaciones a la matriz de estado inicial, dichas transformaciones son las siguientes:

VI-B1. SubBytes(): Esta operación consiste en una transformación no lineal, donde se realiza una sustitución de cada byte por otro byte establecido en la caja de sustitución (S-box) ver cuadro IV .

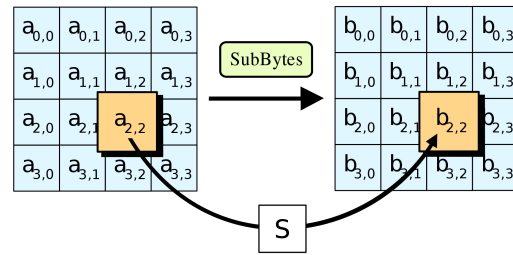


Figura 3. Transformación SubBytes

AES define una matriz de valores de *bytes* de 16×16 llamada S-Box, que contiene una permutación de todos los 256 valores de 8 *bits* posibles.

-	x0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	xA	xB	xC	xD	xE	xF
0x	63	7E	77	7B	F2	6B	6F	C5	30	01	67	2B	FE	D7	AB	76
1x	CA	82	C9	7D	FA	59	47	F0	AD	D4	A2	AF	9C	A4	72	C0
2x	B7	FD	93	26	36	3F	F7	CC	34	A5	E5	F1	71	D8	31	15
3x	04	C7	23	C3	18	96	05	9A	07	12	80	E2	EB	27	B2	75
4x	09	83	2C	1A	1B	6E	5A	A0	52	3B	D6	B3	29	E3	2F	84
5x	53	D1	00	ED	20	FC	B1	5B	6A	CB	BE	39	4A	4C	58	CF
6x	D0	EF	AA	FB	43	4D	33	85	45	F9	02	7F	50	3C	9F	A8
7x	51	A3	40	8F	92	9D	38	F5	BC	B6	DA	21	10	FF	F3	D2
8x	CD	0C	13	EC	5F	44	17	C4	A7	7E	3D	64	5D	19	73	
9x	60	81	4F	DC	22	2A	90	88	46	EE	B8	14	DE	5E	0B	DB
Ax	E0	32	3A	0A	49	06	24	5C	C2	D3	AC	62	91	95	E4	79
Bx	E7	C8	37	6D	8D	D5	4E	A9	6C	56	F4	EA	65	7A	AE	08
Cx	BA	78	25	2E	1C	A6	B4	C6	E8	DD	74	1F	4B	BD	8B	8A
Dx	70	3E	B5	66	48	03	F6	0E	61	35	57	B9	86	C1	1D	9E
Ex	E1	F8	98	11	69	D9	8E	94	9B	16	87	E9	CE	55	28	DF
Fx	8C	A1	89	0D	BF	E6	42	68	41	99	2D	0F	B0	54	BB	16

Cuadro IV
S-BOX

Ejemplo 3: Si necesitamos realizar la transformación *SubBytes* al número {19}, no tenemos que hacer nada mas que mirar el cuadro IV , fijándonos en la fila 1x y la columna x9, así obteniendo {D4} que es la transformación de {19}.

VI-B2. ShiftRows(): Esta transformación consiste en una rotación cíclica hacia la izquierda de las filas de la matriz de estado, de manera que la primera fila permanece igual, la segunda fila se rota hacia la izquierda una posición, la tercera fila se rota hacia la izquierda dos posiciones y la ultima fila se rota tres posiciones a la izquierda.

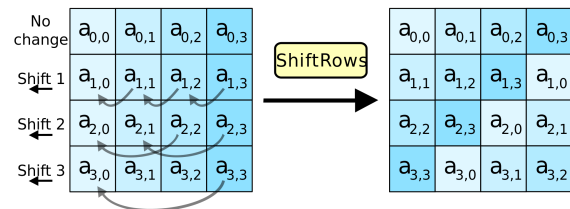


Figura 4. Transformación ShiftRows

VI-B3. MixColumns(): Esta transformación consiste en multiplicar las columnas de bytes módulo $x^4 + 1$ por el polinomio

$$c(x) = \{03\}x^3 + \{01\}x^2 + \{01\}x + \{02\}$$

Es mas sencillo verlo como una multiplicación matricial. Sea:

$$b(x) = c(x) \otimes a(x) :$$

$$\begin{bmatrix} b_{0,c} \\ b_{1,c} \\ b_{2,c} \\ b_{3,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 02 & 03 & 01 & 01 \\ 01 & 02 & 03 & 01 \\ 01 & 01 & 02 & 03 \\ 03 & 01 & 01 & 02 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{0,c} \\ a_{1,c} \\ a_{2,c} \\ a_{3,c} \end{bmatrix} \text{ para } 0 \leq c \leq \text{Nb.}$$

Observación 1: \otimes indica la multiplicación de dos polinomios (cada uno de grado < 4) modulo $x^4 + 1$.

Los cuatro *bytes* de la columna son reemplazados como se ve a continuación:

$$\begin{aligned} b_{0,c} &= (\{02\} \bullet a_{0,c}) \oplus (\{03\} \bullet a_{1,c}) \oplus a_{2,c} \oplus a_{3,c} \\ b_{1,c} &= a_{0,c} \oplus (\{02\} \bullet a_{1,c}) \oplus (\{03\} \bullet a_{2,c}) \oplus a_{3,c} \\ b_{2,c} &= a_{0,c} \oplus a_{1,c} \oplus (\{02\} \bullet a_{2,c}) \oplus (\{03\} \bullet a_{3,c}) \\ b_{3,c} &= (\{03\} \bullet a_{0,c}) \oplus a_{1,c} \oplus a_{2,c} \oplus (\{02\} \bullet a_{3,c}) \end{aligned}$$

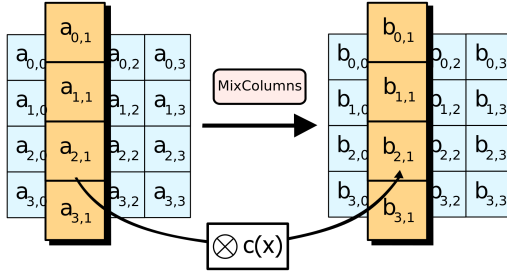


Figura 5. Transformación MixColumns

VI-B4. AddRoundKey(): Esta transformación consiste en aplicar la operación OR-Exclusivo (XOR) entre cada byte de la matriz de estado que proviene de la transformación anterior (MixColumns) y una subclave que se genera a partir de la clave del sistema para esa ronda.

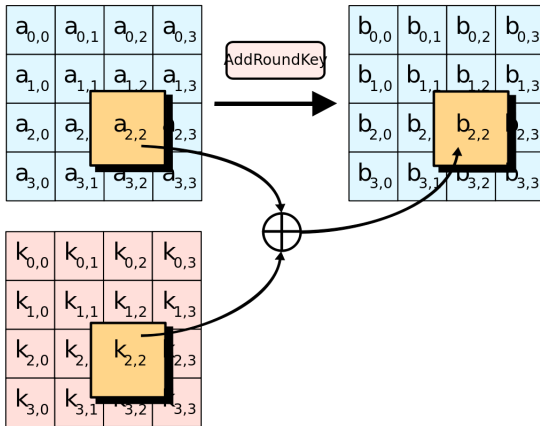


Figura 6. Transformación AddRoundKey

En la figura que representa el proceso de cifrado (Figura 7) esta transformación se realiza en la ronda inicial (ronda 0). Como se definió previamente nuestra longitud de clave será de 128 *bits*, por tanto la subclave de la ronda 0 es la propia clave de cifrado.

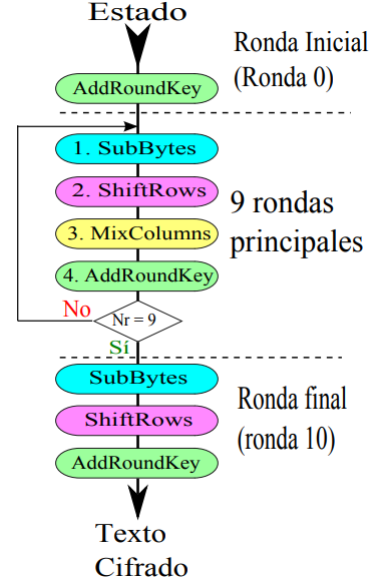


Figura 7. Proceso de cifrado AES

VI-C. Cifrado inverso AES

AES es un cifrador de clave simétrica por tanto la llave que se utiliza para *cifrar* se utilizará para *descifrar*.

Básicamente, el proceso de *descifrado* consiste en aplicar en orden inverso las trasformaciones aplicadas en el proceso de *cifrado*.

Las transformaciones a aplicar son las siguientes:

VI-C1. InvSubBytes(): La transformación *InvSubBytes* es, al igual que la transformación *SubBytes*, una sustitución no lineal de bytes.

-	x0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	xA	xB	xC	xD	xE	xF
0x	52	09	6A	D5	30	36	A5	38	BF	40	A3	9E	81	F3	D7	FB
1x	7C	E3	39	82	9B	2F	FF	87	34	8E	43	44	C4	DE	E9	CB
2x	54	7B	94	32	46	C2	23	3D	EE	4C	95	0B	42	FA	C3	4E
3x	08	2E	A1	66	28	D9	24	B2	76	5B	A2	49	6D	8B	D1	25
4x	72	F8	F6	64	86	68	98	16	D4	4A	5C	CC	5D	65	B6	92
5x	6C	70	48	50	FD	ED	B9	DA	5E	15	46	57	A7	8D	9D	84
6x	90	D8	AB	00	8C	BC	D3	0A	F7	E4	58	05	B8	B3	45	06
7x	D0	2C	1E	8F	CA	3F	0F	02	C1	AF	BD	03	01	13	8A	6B
8x	3A	91	11	41	4F	67	DC	EA	97	F2	CF	CE	F0	B4	E6	73
9x	96	AC	74	22	E7	AD	35	85	E2	F9	37	E8	1C	75	DF	6E
Ax	47	F1	1A	71	1D	29	C5	89	6F	B7	62	0E	AA	18	BE	1B
Bx	FC	56	3E	4B	C6	D2	79	20	9A	DB	C0	FE	78	CD	5A	F4
Cx	1F	DD	A8	33	88	07	C7	31	B1	12	10	59	27	80	EC	5F
Dx	60	51	7F	A9	19	B5	4A	0D	2D	E5	7A	9F	93	C9	9C	EF
Ex	A0	E0	3B	4D	AE	2A	F5	B0	C8	EB	BB	3C	83	53	99	61
Fx	17	2B	04	7E	BA	77	D6	26	E1	69	14	63	55	21	0C	7D

Cuadro V
INVS-BOX

El cuadro V es inverso al cuadro IV, que representaba la S-box, este cuadro inverso se llama InvS-Box.

Ejemplo 4: Recordemos el ejemplo que se propuso en la transformación *SubBytes*, donde el byte {19} tomaba el valor {D4}. Si ahora queremos aplicar la transformación *InvSubBytes* al byte {D4}, miramos en el cuadro V la fila **Dx** y la columna **x4**, dando como resultado el byte {19}.

VI-C2. Transformación *InvShiftRows*(): Esta transformación consiste en una rotación cíclica de *bytes* hacia la derecha. Por tanto, es una rotación en dirección opuesta a la que se propuso en la transformación *ShiftRows*.

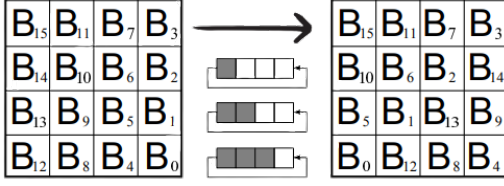


Figura 8. Transformación *InvShiftRows*

VI-C3. Transformación *InvMixColumns*(): Es la operación inversa de *MixColumns*, en esta transformación cada columna se trata como un polinomio y luego se multiplica módulo x^4+1 con un polinomio fijo:

$$c^{-1}(x) = \{0b\}x^3 + \{0d\}x^2 + \{09\}x + \{0e\}$$

De nuevo es más fácil verlo como una multiplicación matricial y recordando la observación 1, tenemos:

$$a(x) = c^{-1}(x) \otimes b(x)$$

$$\begin{bmatrix} a_{0,c} \\ a_{1,c} \\ a_{2,c} \\ a_{3,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0e & 0b & 0d & 09 \\ 09 & 0e & 0b & 0d \\ 0d & 09 & 0e & 0b \\ 0b & 0d & 09 & 0e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{0,c} \\ b_{1,c} \\ b_{2,c} \\ b_{3,c} \end{bmatrix} \text{ para } 0 \leq c \leq \text{Nb.}$$

donde los *bytes* son reemplazados de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} a_{0,c} &= (\{0e\} \bullet b_{0,c}) \oplus (\{0b\} \bullet b_{1,c}) \oplus (\{0d\} \bullet b_{2,c}) \oplus (\{09\} \bullet b_{3,c}) \\ a_{1,c} &= (\{09\} \bullet b_{0,c}) \oplus (\{0e\} \bullet b_{1,c}) \oplus (\{0b\} \bullet b_{2,c}) \oplus (\{0d\} \bullet b_{3,c}) \\ a_{2,c} &= (\{0d\} \bullet b_{0,c}) \oplus (\{09\} \bullet b_{1,c}) \oplus (\{0e\} \bullet b_{2,c}) \oplus (\{0b\} \bullet b_{3,c}) \\ a_{3,c} &= (\{0b\} \bullet b_{0,c}) \oplus (\{0d\} \bullet b_{1,c}) \oplus (\{09\} \bullet b_{2,c}) \oplus (\{0e\} \bullet b_{3,c}) \end{aligned}$$

VI-C4. Transformación *AddRoundKey*(): Esta transformación es la que se describió en la Sección VI-B4, es su propio inverso, ya que solo implica una aplicación de la operación XOR.

En la figura 9 se encuentra el diagrama del cifrado inverso de AES.

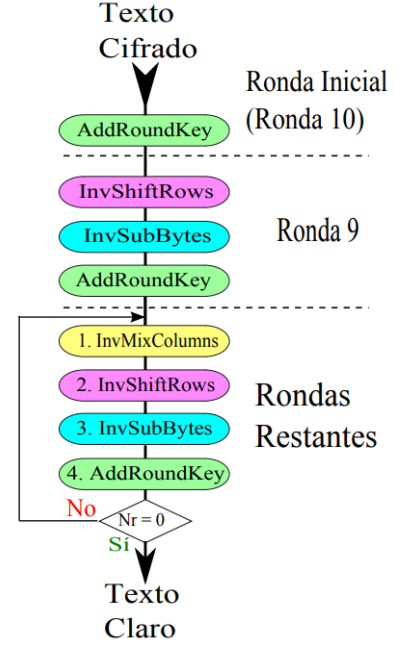


Figura 9. Proceso de cifrado inverso AES

- [5] GitHub Docs. *Repositorio proyecto de investigación*. https://github.com/KevinHe23/Proyecto_investigacion.
- [6] GitHub Docs. *Repositorio implementación AES*. <https://github.com/KevinHe23/AES-python>.

VII. RESULTADOS

VIII. CONCLUSIONES

IX. TRABAJO A FUTURO

REFERENCIAS

- [1] STALLINGS, W. (2016). *Cryptography and Network Security: Principles and Practice* (7.^a ed.). Pearson Education.
- [2] TANENBAUM, & WHETERALL. (2011). *Redes de computadoras* (5.^a ed.). Pearson Education.
- [3] TAPIA-RECILLAS, H. (2011). *Sobre algunas aplicaciones de los campos de Galois*. Miscelánea Matemática de la sociedad matemática Mexicana. https://miscelaneamatematica.org/download/tbl_articulos.pdf2_b83a7656c55ef738.353330362e706466.pdf
- [4] NIST. (2001). *Announcing the Advanced Encryption Standard (AES)*. Federal Information Processing Standards Publication 197.