

# Protocolo Criptográfico de Firma Digital para el Signado de Documentos Digitales con Criptografía Asimétrica para el Intercambio Seguro de Información en la Empresa CDS, S.C.

Dr. Abraham Jorge Jiménez Alfaro<sup>1</sup>, Mtro. Edgar Corona Organiche<sup>2</sup>,  
Mtro. Irving Cardiel Alcocer Guillermo<sup>3</sup> y Dra. Mercedes Flores Flores<sup>4</sup>



## Resumen

La firma digital corresponde a la versión informática de la firma personal manuscrita o firma ológrafa. Éstas se utilizan ampliamente como prueba de autoría o acuerdo de una parte, entre otros usos, siempre en referencia a un documento. Sin embargo, pueden resultar inseguras en tanto que, con relativa facilidad, son aplicadas de manera deshonesta. Por ejemplo, pueden ser tomadas desde una pieza de papel para pasarlas a otra, o modificar documentos luego de la aplicación de la firma. La firma digital se trata de una tecnología que pretende resolver estos problemas en documentos digitales. En este artículo, se presenta la arquitectura de un protocolo criptográfico de firma digital para signar documentos en la empresa CDS, S.C., y así garantizar la prueba de autoría de un documento digital.

**Palabras Clave:** *Firma Digital, Cifrado Clave Publica, Protocolo de Firma Digital.*

## Abstract

*The digital signature corresponds to the computerized version of the handwritten personal signature or holographic signature. These are widely used as proof of authorship or agreement by a party, among other uses, always in reference to a document. However, they can be insecure, as they are relatively easily applied dishonestly. For example, they can be taken from one piece of paper to pass on to another, or modify documents after signature application. The digital signature is a technology that aims to solve these problems in digital documents. In this article, is presents the architecture of a digital signature cryptographic protocol to sign documents in the company CDS, S.C., to guarantee proof of authorship of a digital document.*

**Keywords:** *Digital Signature, Public Key Encryption, Digital Signature Protocol.*

## Introducción

Los protocolos son una serie de pasos que envuelven a dos o más partes, diseñados para realizar una tarea. En particular, si usan un algoritmo criptográfico se denominan protocolos criptográficos (Stallings, 2017).

Para Stallings (2019) los algoritmos criptográficos por sí solos no cumplen con la función de resolver los problemas de seguridad; deben formar parte de un protocolo criptográfico.

Por otro lado, supone también que:

- Las partes involucradas deben conocer el protocolo.
- Las partes lo aceptan y concuerdan en aplicarlo.
- El protocolo no tiene ambigüedades.
- El protocolo es completo, para toda situación se contempla una acción determinada.

Todas estas características son fundamentales para permitir que:

- Las comunicaciones entre computadoras sean seguras, al tener que seguir un protocolo formal para el intercambio de mensajes.
- Al especificar los pasos que se deben seguir, sea posible examinar en detalle si existen puntos débiles en cuanto a la seguridad; y por otro lado, evitar realizar acciones fuera del protocolo con intenciones delictivas.

## I.- Arquitectura de Protocolo Criptográfico de Firma Digital

Para Stallings (2019), los problemas de seguridad de las redes pueden dividirse, de manera general, en cuatro áreas interrelacionadas:

1.-**El secreto**, encargado de mantener la información fuera de las manos de usuarios no autorizados.

2.-**La validación de identificación**, encargada de determinar la identidad de la persona o computadora con la que se está hablando.

3.-**El control de integridad**, encargado de asegurar que el mensaje recibido sea el enviado por la otra parte y no un mensaje manipulado por un tercero.

4.-**El no repudio**, encargado de asegurar la “firma” de los mensajes, de igual manera a como se firma en papel una petición de compra/venta entre empresas.

Las firmas manuales en los documentos se usan desde tiempos inmemoriales como prueba de autoría, o al menos de consentimiento con el contenido del documento. Para Stallings (2019) existen algunas características que las hacen tan confiables:

- **La firma es inolvidable e irrepudiable.** El firmante no puede aducir que no sabe si es su firma, o negarla.
- **La firma es auténtica.** El que recibe el documento está convencido de que el firmante deliberadamente signó el documento.
- **La firma no es reusable.** Es parte del documento y no se puede mover o copiar a otro.
- **La firma es inalterable.** Se asume que una firma realizada por otro medio distinto al manual, pero que cumpla con estas características, es confiable y puede ser aceptada por las partes; es el caso de la firma efectuada por un medio digital.



## I.1.- Criptografía y Criptoanálisis

El criptoanálisis (Maiorano, 2009), se encarga de descifrar los mensajes, la criptografía busca métodos más seguros de cifrado, la criptografía viene del griego *kryptos* = oculto y *graphe* = escrito. Para Stallings (2017), se clasifica en:

- Criptografía clásica. Algoritmo secreto. Cifrados por sustitución y transposición, entre otros.
- Criptografía moderna. Algoritmo público. Cifrados a base de claves que se mantienen secretas.

Para Maiorano (2019), el cifrado y el descifrado constan de una serie de etapas para que un texto normal se cifre y descifre, a fin de garantizar la seguridad de información (ver Figura 1).



Figura 1

La encriptación o cifrado.

- El texto normal (P) se transforma (cifra) mediante una función que tiene como parámetro una clave  $k$ .
- $C = E_k(P)$  es el texto cifrado (C) obtenido a partir de P, usando la clave  $k$  y la función matemática  $E_k$  para codificar.
- $P = D_k(C)$  es el descifrado de C para obtener el texto normal P.

Para el descifrado se necesita la inversa de la función matemática descrita como:

$$D_k(E_k(P)) = P$$

dónde:

- E y D son sólo funciones matemáticas parametrizadas con la clave  $k$ .
- Estas funciones  $E()$  y  $D()$  son conocidas por el criptoanalista, pero no la clave.

## I.2.- Algoritmos del Protocolo Criptográfico

### 1.2.1.- Algoritmos Simétricos

Llamados algoritmos de una clave, se usan para cifrar y descifrar mensajes con la misma clave. En algunos casos pueden tener una clave para cada operación, pero se puede deducir una clave de la otra (Stallings, 2019).

Algunos protocolos utilizan la figura de un árbitro, que es una tercera parte desinteresada y confiable, la cual garantiza a las partes involucradas el cumplimiento de un protocolo. Es desinteresada, pues no tiene intereses particulares para intervenir en el protocolo, y es confiable, pues las partes toman como honestas las acciones que realiza.

El árbitro otorga mayor seguridad en algunos protocolos. Sin embargo, también genera algunos problemas:

- Demoras en la ejecución del protocolo, ya que se agrega la transmisión de datos al árbitro, al total de mensajes transmitidos entre las partes.
- Cuello de botella en el computador del árbitro.

El árbitro es otro punto factible de atacar para alguien que desee quebrar el protocolo.

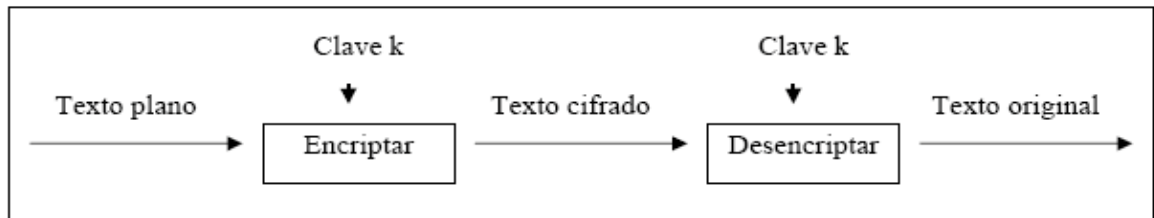
El emisor y el receptor deben acordar la clave que usarán. El emisor la usa para encriptar el mensaje plano y el receptor para desencriptarlo (ver Figura 2).

El protocolo es:

1. *A* y *B* concuerdan un algoritmo simétrico.
2. *A* y *B* concuerdan una clave.
3. *A* encripta el mensaje con el algoritmo y la clave seleccionados.
4. *A* envía el mensaje cifrado a *B*.
5. *B* desencripta el mensaje cifrado con el algoritmo y la clave seleccionados.

Figura 2

Cifrado Simétrico.

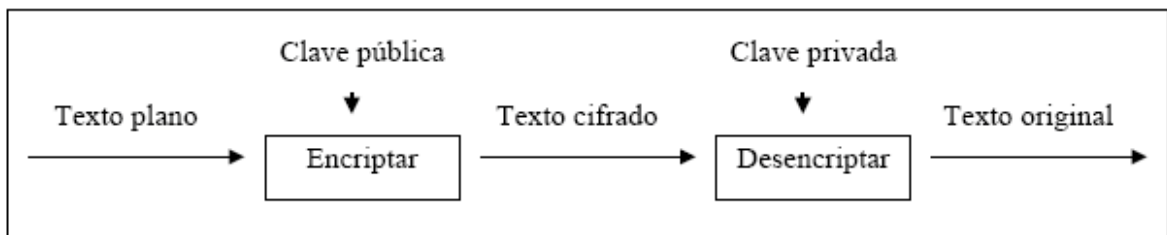


### 1.2.2- Algoritmos de Clave Pública

Figura 3

Cifrado Asimétrico.

Estos algoritmos usan una clave para encriptar el mensaje claro, llamada clave pública, y otra para desencriptarlo, llamada clave privada o secreta. Esta clave no se puede deducir de la clave pública (ver Figura 3).



Este método se puede comparar con una casilla de correos; cualquier persona puede dejar una carta en la casilla de A, pero sólo A tiene la llave para abrirla y leer las cartas.

El protocolo es:

1. A y B concuerdan un algoritmo de clave pública.
2. A recibe la clave pública de B ( $k_B$ ).
3. A encripta el mensaje con el algoritmo seleccionado y la clave pública de B ( $k_B$ ).
4. A envía el mensaje cifrado a B.
5. B desencripta el mensaje cifrado con su clave privada.

### 1.3.- Algoritmo Híbrido del Protocolo de Cifrado

En algunos casos, es conveniente combinar los dos tipos de algoritmos; para encriptar mensajes largos, los simétricos son más rápidos, y para distribuir las claves que usa el algoritmo asimétrico, los algoritmos de clave pública son más seguros (Stallings, 2017).

El protocolo es:

1. A y B concuerdan un algoritmo simétrico y uno de clave pública.
2. B recibe la clave pública de A ( $k_A$ ).
3. B encripta la clave que usará en el algoritmo simétrico ( $k_B$ ) con  $k_A$ .
4. B envía a A  $k_B$  encriptada.
5. A desencripta con su clave privada a  $k_B$ .
6. A encripta el mensaje con  $k_B$ .
7. B desencripta el mensaje con  $k_B$ .

Para Maiorano (2009) desde el punto de vista práctico los pasos son:

- 1.- Se conoce solo el texto cifrado (ver Figura 4).



Figura 4

- 2.- Conoce un texto cifrado y el texto normal al que pertenece (ver Figura 5).

Cifrado Asimétrico.  
Texto Cifrado.



Figura 5

Cifrado Asimétrico.  
Textos.

3.- Dispone del sistema de cifrado. Puede escoger un texto normal y cifrarlo (ver Figura 6).



Figura 6

Cifrado Asimétrico.  
Sistema de Cifrado.

## II.- Firma Digital

Para Maiorano (2009) la firma digital corresponde a la versión informática de la firma personal manuscrita u ológrafa; esto es, se usará para probar la autoría de, o el acuerdo a, la información contenida en un documento electrónico. Existen diferentes protocolos para implementar esta funcionalidad criptográfica. La implementación más utilizada involucra la utilización de funciones hash junto con el protocolo de cifrado con criptografía asimétrica. Básicamente, la parte autora o firmante del documento firmará el hash resultante (Stalling, 2019). Esto es: La parte “A” producirá el hash del documento, lo encriptará con su llave privada y enviará esto, junto con el documento, a la parte “B”. “B” computará por su cuenta el hash sobre el documento. Luego, mediante la llave pública de “A”, descryptará el hash que “A” ha computado. Entonces “B” podrá comparar ambos hashes y verificar la firma.

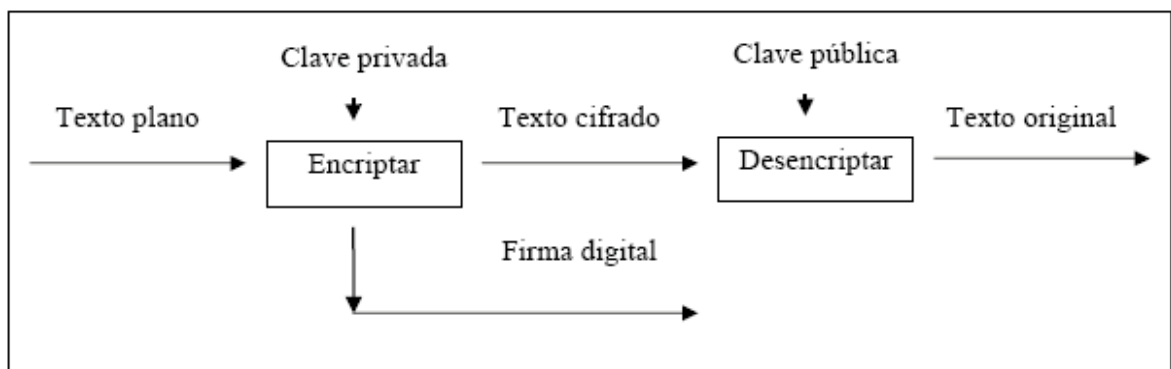
### 2.1 Protocolo de cifrado de Algoritmos de Clave Pública en Firma Digital

Para Stallings (2019), la idea es usar el mecanismo de clave pública y clave privada para firmar documentos electrónicos. Algunos algoritmos de clave pública, como el RSA, sirven tanto para encriptar como para firmar mensajes.

RSA es el algoritmo de cifrado asimétrico más popular en la actualidad. Creado por Ron Rivest, Adi Shamir y Leonard Adleman –notar que son las iniciales de los apellidos las que forman el nombre del algoritmo– fue publicado en el año 1977. Actualmente, el algoritmo es considerado seguro, en tanto sean utilizadas llaves de longitud suficientemente seguras (se siguen utilizando llaves de 1,024 bits, pero ya se recomienda al menos una longitud de 2,048). El algoritmo sirve tanto para encriptar y descryptar, como para la generación de firmas digitales. Hoy día, es ampliamente

Figura 7

Protocolo Criptográfico para la generación de Firma Digital.





utilizado en protocolos de comercio electrónico, entre otras aplicaciones (Maiorano, 2009).

Es decir, que para firmar sólo encripta mensajes (con su clave privada), y cualquiera puede desencriptarlos con la clave pública. El mensaje encriptado es la firma del mensaje (ver Figura 7), ya que sólo el dueño de la clave privada pudo generarlo (Stallings, 2019).

#### El protocolo es:

1. *A* y *B* concuerdan un algoritmo de firma digital con clave pública.
2. *A* firma el mensaje con su clave privada  $k_A$ .
3. *A* envía a *B* el mensaje firmado.
4. *B* desencripta el mensaje con la clave pública de *A* y verifica la firma.



Se puede observar que se cumplen las características que tiene una firma manual:

- La firma es inolvidable e irrepudiable, pues *A* y sólo *A* conoce la clave privada, y *B* demuestra que *A* lo firmó con la clave pública.
- La firma es auténtica. *B* lo verifica con la clave pública de *A*.
- La firma no es reusable, ya que es función del mensaje.
- La firma es inalterable, pues si cambia el mensaje, ya no concuerda con la firma.

#### La Firma Digital:

- Debe ser fácil de generar.
- Será irrevocable, no rechazable por su propietario con el acuse de recibo.
- Será única, sólo posible de generar por su propietario.
- Será fácil de autenticar o reconocer por su propietario y los usuarios receptores.
- Debe depender del mensaje (por compendio) y del autor (por certificado).

Para Maiorano (2009) y Stallings (2019) la Firma Digital se genera entonces como sigue:

Supongamos los algoritmos públicos tal que:

$$E(D(P)) = P$$

$$D(E(P)) = P$$

**El algoritmo de cifrado  $E()$ , descifrado  $D()$  y la clave de cifrado, se hacen públicos** (de ahí el nombre de criptografía de clave pública), **pero se mantiene secreta la clave de descifrado (ver Figura 8).  $E_A$  es clave pública y  $D_B$  es clave secreta** (Stallings, 2019).



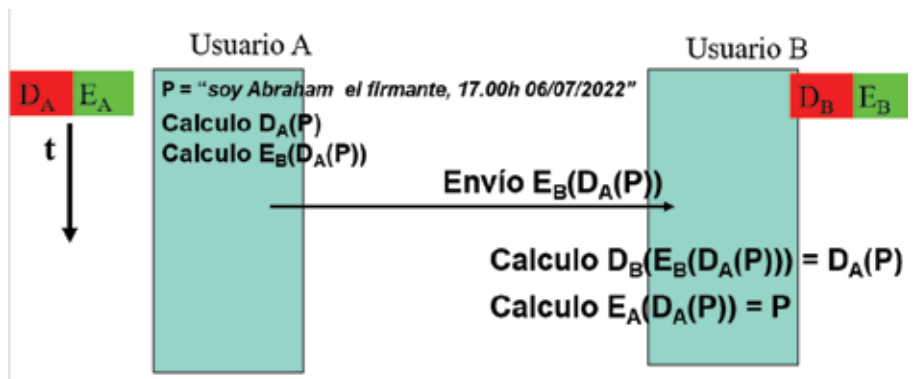


Figura 8

Etapas del Protocolo Criptográfico para la Generación de Firma Digital.

### III.- Resultados

De acuerdo con la Figura 8, el algoritmo del Protocolo Criptográfico se basa en factorizar números grandes:

1. Seleccionar dos números primos grandes,  $p$  y  $q$  (generalmente mayores que  $10^{100} \rightarrow 1024$  bits).
2. Calcular:

$$n = p * q$$

$$z = (p-1) * (q-1) \text{ la función multiplicativa de Euler.}$$

3. Seleccionar un número  $d$  primo relativo con  $z$  (sin ningún factor común).
4. Encontrar  $e$  tal que  $((e * d) \bmod z) = 1$ .
5. Los datos que serán públicos son el par  $(e, n)$  y privados  $(d, n)$ .

La Figura 9 presenta la captura del texto que firmará el documento de acuerdo con el algoritmo del **Protocolo Criptográfico**.



Figura 9

Texto a firmar en las Etapas del Protocolo Criptográfico para generar el cifrado de Firma Digital.

La Figura 10 presenta el cifrado y generación de la firma digital de acuerdo con el algoritmo del protocolo criptográfico.



Figura 10

Si el criptoanalista pudiera factorizar  $n$  (conocido públicamente), podría encontrar  $p$  y  $q$ , y a partir de éstos,  $z$ . Equipado con el conocimiento de  $z$  y de  $e$ , que es pública, puede encontrar  $d$  usando el algoritmo extendido de Euclides:

$$d = ((Y * z) + 1) / e \text{ para } Y = 1, 2, 3, \dots \text{ hasta encontrar un } d \text{ entero,}$$

La Figura 11 presenta el descifrado de firma digital de acuerdo con el algoritmo del protocolo criptográfico.

Ejecución de las Etapas del Protocolo Criptográfico para generar el cifrado de firma Digital.

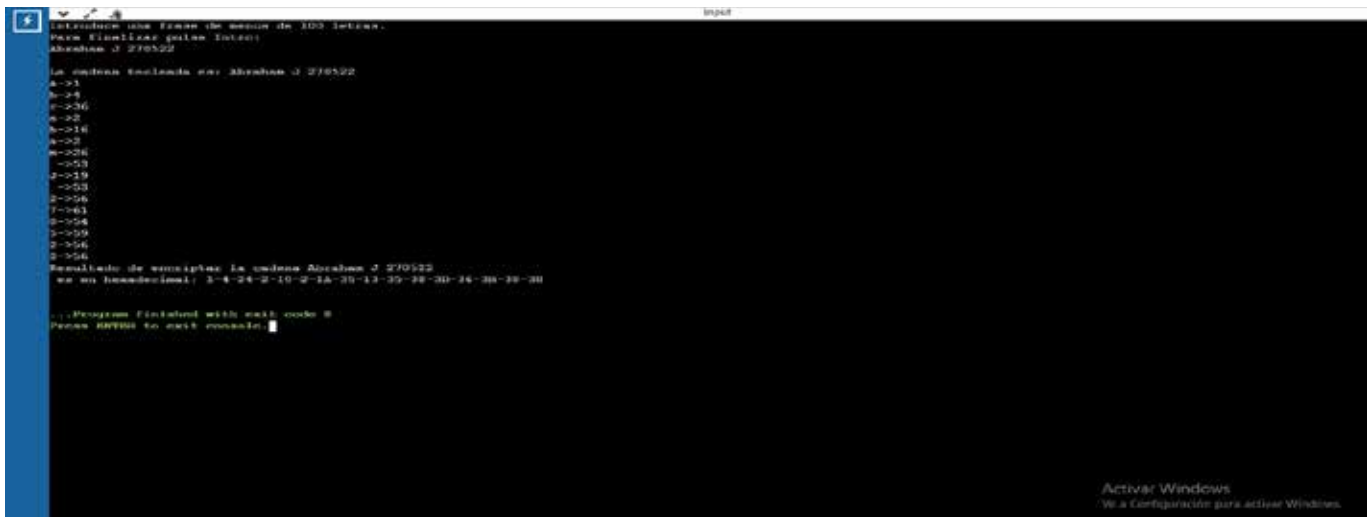


Figura 11

Ejecución de las Etapas del Protocolo Criptográfico para generar el descifrado de Firma Digital.

## Conclusiones

El protocolo criptográfico de firma digital al emplear la encriptación y las firmas en el documento, permite lograr mayor seguridad; el protocolo criptográfico hace posible el signado de documentos en forma segura, al establecer un protocolo entre las partes involucradas, considerando las siguientes fases:

1. *A* y *B* concuerdan un algoritmo de firma digital (con las claves pública  $f_A$  y la privada  $F_A$ ) y otro de clave pública (con las claves pública  $k_B$  y privada  $K_B$ ).
2. *A* firma el mensaje con su clave privada ( $F_A$ ).
3. *A* encripta el mensaje y la firma con la clave pública de *B* ( $k_B$ ) y se los envía *B*.
4. *B* desencripta el mensaje y la firma con su clave privada ( $K_B$ ).
5. *B* genera el hash a partir del mensaje desencriptado.
6. *B* desencripta la firma recibida con la clave pública de *A* ( $f_A$ ), y lo compara con el hash generado anteriormente. Si son iguales, la firma es válida.



### Referencias

Craig, H. (2003). *Networking Personal Computers, whit TCP/IP*. O'Reilly Associates, Inc. Sebastopol, CA 95472.

Liu C.(2000). *Managing Internet Information Services*. O'Reilly Associates, Inc. Sebastopol, CA 95472

Maiorano, A. (2009). *Criptografía: técnicas de desarrollo para profesionales*. México: Alfaomega.

Stallings, W. (2017). *Fundamentos de Seguridad en Redes: Aplicaciones y Estandáres*. México: Pearson, Prentice Hall.

Stallings, W. (2019). *Criptografía y Seguridad de Red: Principios y Práctica*. México: Pearson, Prentice-Hall.