Universidad de Valladolid

Escuela de Ingeniería Informática de Segovia.

Grado en Ingeniería Informática

de Servicios y Aplicaciones

Hacia un estándar de criptografía post-cuántica

Alumno: Khalid El Baroudi Rakdou

Tutor: José Ignacio Farrán Martín

Curso: 2022-2023

Hacia un estándar de criptografía post-cuántica: estudio teórico y práctico.

Khalid El Baroudi Rakdou.

15 de septiembre de 2023

Índice general

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi tutor por aconsejarme este tema del Trabajo de Fin de Grado, ya que he aprendido otro apartado de la informática fascinante, a todos los profesores que me han impartido clase ya que me han hecho mejorar y aprender en el ámbito académico como en el humano y sobre todo a mi familia y amigos que me han brindado el apoyo necesario para seguir adelante

Introducción

El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología más conocido por su acrónimo NIST, es la institución encargada de ayudar a las pequeñas, medias y grandes empresas a analizar los riesgos de ciberseguridad que existen, además de una protección de datos y redes para poder reducir al máximo posible los riesgos existentes. Este instituto depende del Departamento de Comercio de EE. UU. (Comisión Federal de Comercio, s.f.)

Para profundizar más en el tema, hay que comprender que es la criptografía post cuántica. Consiste en una rama de la criptografía que trata de desarrollar algoritmos que sean capaces de resistir ante ataques de ordenadores cuánticos.

La criptografía tradicional de clave pública se basa en problemas matemáticos complejos, como la factorización del logaritmo discreto, RSA y ElGamal, sin embargo, para los ordenadores cuánticos sería tarea fácil ya que no se rigen mediante el sistema de bit binario (computación clásica) si no por el qubit (computación cuántica), el cual permite a diferencia del bit ordinario (0 o 1) una superposición de ambos al mismo tiempo. Esta cualidad permite a los ordenadores cuánticos ser exponencialmente mejores que los ordenadores tradicionales lo que se denomina paralelización cuántica. (Mena Viveros, 2013)

El concurso NIST sobre criptografía post-cuántica fue creado en 2016 para solucionar entre otros los inconvenientes anteriormente mencionados, podríamos decir que es un concurso en el que la colaboración entre los investigadores ha sido clave para un avance significativo en la seguridad ante los ataques de los ordenadores cuánticos.

La última ronda del concurso comenzó en 2022 y ha finalizado en marzo de 2023. Se evaluaron 9 algoritmos en la tercera ronda, estos fueron estudiados según su seguridad, usabilidad y rendimiento.

Los 9 algoritmos los podemos dividir en 3 categorias:

- **Basado en teoría de códigos correctores de errores**: Consisten en algoritmos que utilizan la teoría de códigos para elaborar algoritmos resistentes a los ordenadores cuánticos. En este grupo el finalista del torneo es el algoritmo Classic McEliece. Fue introducido en 1978 por Robert McEliece, sufrió un cambio en el aumento de parámetros de seguridad para pailar el aumento de la velocidad de los ordenadores además es el algoritmo más investigado del concurso NIST por lo tanto es el que tiene mayor nivel de seguridad. (PQSecure, 2020)

- **Basado en retículos**: Consisten en algoritmos que utilizan técnicas matemáticas basadas en retículos para resolver algoritmos criptográficos, se utilizan para asegurarnos de la seguridad de los sistemas criptográficos. Podemos destacar 3 finalistas que son CRYSTALS-KYBER, NTRU y SABER, cuyo ganador es el primer citado. El CRYSTALS-KYBER es un criptosistema de clave pública, su función es resolver el inconveniente M-LWE. Este algoritmo es IND-CCA2 y consta de 3 conjuntos diferentes para acomodarse al nivel de seguridad NIST 1,3,5. El NTRU es otro criptosistema de clave pública, también seguro ya que cumple el IND-CCA2. Trata sobre la dificultad de resolver problema de aprendizaje en anillos (Ring-LWE).

Se podría considerar que es una fusión del NTRUEncrypt y NTRUHRSS-KEM antes de la ronda 2.

(PQSecure, 2020)

- **Basado en isogenias de curvas elípticas**: Se fundamenta en utilizar las propiedades de las isogenias, las cuales son aplicaciones algebraicas entre curvas elípticas. La clave de estos tipos de algoritmos es encontrar una función que mapee una curva elíptica a otra. En esta sección no hay ningún finalista y solo una alternativa que es el algoritmo SIKE. Este tiene la clave pública más pequeña de todos los candidatos, pero es el más lento.

(PQSecure, 2020)

Mas adelante se profundizará más en el concurso NIST.

Parte I

Documentación

Capítulo 1

Descripción del proyecto

En este proyecto se va a realizar un estudio teórico-práctico sobre el concurso de criptografía post-cuántica del NIST y la computación cuántica, sobre todo se va a hablar de los concursantes del torneo en esta disciplina.

Además, se va a sustituir el estudio práctico de un algoritmo de los seleccionados por una comparación de todos los algoritmos, comparando sus claves, textos cifrados, ventajas, desventajas, uso, tipos…, esta proposición fue consensuada previamente con el tutor del proyecto.

1.1 Introducción

1.1.1 Motivación

La criptografía es la ciencia que forma parte tanto de la informática como de las matemáticas, que tiene la función de encargarse de transformar información (texto, imágenes, videos etc.) para que terceros no puedan interceptar y leer la información que se quiere ocultar menos a el emisor autorizado mediante un canal seguro, esto ayudando a la privacidad, seguridad e integridad de los datos.

Estas características son esenciales para tratar información bancaria, financiera y sobre todo información personal que en malas manos puede ser muy perjudicial para el usuario.

Podríamos indicar diferentes tipos de cifrado como: clave privada y pública.

Ante la creciente amenaza de los ordenadores cuánticos se han visto obligados desarrolladores de todo el mundo a desarrollar cifrados cuánticos que ayuden a controlar los ataques cuánticos y las amenazas que puedan ocasionar.

Actualmente el tema de cifrado cuántico es un tema que se desconoce en la mayoría de la población, están más familiarizados con el cifrado antiguo de textos mediante sustitución de letras por su frecuencia entre otros, además de la idea general que tiene el ciudadano sobre la criptografía y no sobre el conocimiento de lo que puede conllevar este tema.

Este tema propuesto me va a permitir abarcar más conocimiento científico-matemático del que me podía ofrecer otros, además de la posibilidad que se me ofrece de tratar en una materia emergente y que va evolucionando con el paso de los años y el aumento de la evolución tecnológica.

1.1.2 Contextualización del problema de los ordenadores cuánticos

Los ordenadores cuánticos han generado mucha inseguridad y amenaza a los sistemas computacionales clásicos ya que estos no están preparados para ordenadores cuánticos debido a que se realizan cálculos en qubit en vez de bit ordinarios, esto hace que realice cálculos exponencialmente más rápido que los ordinarios.

Por la razón anterior los cifrados hechos originalmente para ordenadores clásicos serán susceptibles a ser vulnerados por los ordenadores cuánticos.

Ejemplos como el RSA y ECC, son sistemas de cifrado actuales, creados ya que están formados por problemas matemáticos de una gran dificultad para ser descifrados por los ordenadores clásicos.

Los ordenadores cuánticos mediante técnicas como superposición pueden resolver estos problemas matemáticos de una forma mucho más rápida que los ordenadores clásicos.

Los ordenadores cuánticos en el ámbito de la inteligencia artificial facilitaran a los equipos aprender información de forma mucho más rápida. Se utiliza sobre todo para métodos predictivos, tema de finanzas, humanidad etc. Todo esto todavía no ha sido puesto en práctica.

La I.A y los ordenadores cuánticos es una unión creada por la evolución del mundo constantemente ya que hay que recoger una serie de datos que cada vez es mayor para técnicas como puede ser el machine learning.

Al hablar de I.A y computación cuántica debemos asociar el termino Quantum Machine Learning (QML).

En el sector de las finanzas y la bancan facilita la detección del fraude y como poder prevenirlo.

Un ejemplo de aplicación de la computación cuántica es la ciencia de los materiales la cuál a la hora de modelar las moléculas de pequeño tamaño necesita una gran capacidad informática. (Claramunt Carriles, 2022)

Existen otras aplicaciones que son de mayor uso como es el reconocimiento de imágenes o la predicción del consumo.

El 4 de mayo de 2022, la presidencia de EE. UU, publicó un escrito para manifestar el liderazgo de EE. UU en la computación cuántica (en el cuál analizaba alguno de los problemas y riesgos de la computación cuántica). (Barbieri, 2022)

Los ordenadores cuánticos utilizan propiedades de la física cuántica, eso hace que pueda obtener datos de forma más rápida y eficiente, esto reduce la complejidad de algunos problemas, como pueden ser los algoritmos criptográficos y la firma electrónica.

Los crimines en la red podrías ser más recurrentes ya que estos ordenadores

cuánticos están hechos para vulnerar las protecciones actuales, como podría ser falsificar firmas. Por todo esto es necesario desarrollar algoritmos post-cuánticos que ayuden a la protección y a la seguridad del usuario.

El memorándum de EE. UU, manifiesta que hay que paliar los riesgos de la computación cuántica lo máximo posible para el año 2035, además de poder ofrecer la capacidad de cambiar de manera inmediata los algoritmos utilizados. (Barbieri, 2022)

Esto último puede ser interpretado de dos formas:

1- Para acoger los resistentes a la criptografía post-cuántica.

2- Reemplazar los elegidos si son susceptibles a un ataque.

Para los países evolucionar en este tipo de computación es esencial, ya que si otro país pudiera desarrollar este tipo de algoritmos antes de mejorar en la seguridad ante estos algoritmos podría considerarse una situación crítica, a la que ningún país quiere llegar. En cambio, si un país se desarrolla antes que otro, le daría una ventaja inmensa sobre otros respecto a ciberataques.

Debido a que hay países que no muestran su evolución en conocimientos como la computación cuántica hace que no se sepa a ciencia cierta si estos algoritmos puedan ser sólidos (como si ocurre con los actuales).

En Europa se estima en que no haya avances al nivel de EE. UU y China, ya que ya ha manifestado que su objetivo no es ser líder de este sector, aunque ya tiene iniciativas para el sector, todo esto nos hace indicar que cuando esta computación sea algo normal dentro de la sociedad traerá algún fallo de seguridad, solidez…

(Barbieri, 2022)

1.1.3 Justificación de la elección del proyecto

El avance de las tecnologías me hizo plantearme que el tema de mi TFG debía ser un campo de la tecnología que estuviese en desarrollo y en un futuro pudiera ser una revolución. Mi idea inicial era hacer un TFG de criptografía ya que tuve una asignatura en mi centro llamada Protocolos de la Información y Comunicaciones Seguras. Me fascinaba la posibilidad de descifrar algoritmos por diferentes metodologías como la posibilidad de cifrar textos para dificultar la manera de que alguien pudiera descifrarlo.

La película “The Imitation Game” dirigida por Morten Tyldum y estrenada en 2014, fue una película que me maravillo además de introducirme en el campo de la criptografía. Hasta entonces no tenía mucha información y conocimiento sobre ello.

El tema concreto de “Hacia un estándar de criptografía post-cuántica”, fue propuesto por mi tutor, me pareció interesante y acepte de inmediato ya que me iba a permitir complementar y mejorar sobre este campo de la informática.

1.2 Objetivos del proyecto

Se realizará un estudio teórico-práctico sobre el concurso NIST en la modalidad de criptografía post-cuántica. Para resumir, se mostrará los objetivos propuestos desde el inicio del TFG:

- Estudio general de la criptografía post-cuántica.
- Desarrollo del concurso NIST para un estándar de cifrado de clave pública.
- Estudio propuestas finalistas en dicho concurso.
- Aprender nuevos métodos de criptografía.
- Comprender como funciona la computación cuántica.

- Comprender los riesgos que esta computación puede y genera en la sociedad.

-´Analizar campos de la informática ligado a la computación cuántica.

1.3 Estructura del proyecto

Capítulo 1 Introducción

Introducción concisa sobre la motivación del proyecto, la contextualización del problema de los ordenadores cuánticos y por último la justificación de la elección del proyecto.

Capítulo 2 Historia y conceptos de la criptografía

Breve descripción de los antecedentes históricos, tratar la seguridad de estos cifrados post-cuánticos y los fundamentos de la criptografía post-cuántica.

Capítulo 3 Criptografía general

Consistirá en el análisis de diferentes tipos de algoritmos, protocolos que ha habido alrededor de la historia, como su funcionamiento.

Capítulo 4 Concurso NIST

Una breve descripción del concurso y de los finalistas por tipo de cifrado. Se procederá a tratar sobre el futuro de la criptografía post- cuántica.

Capítulo 5 Marco práctico

Analizar de forma práctica a los finalistas del certamen, comparación y la evaluación entre ellos.

1.4 Estimación costes

La planificación del proyecto se estimó entre 300 a 360 horas como estipula la guía docente del campus, por lo tanto, mi intención era mantener ese rango, estimo que se ha dedicado al proyecto 350 horas partiendo desde que ya se había seleccionado que

TFG tratar. Estas horas son repartidas en las siguientes tareas o actividades.

Lista de actividades:

- T1: Búsqueda de información para dictar los temas necesarios para el TFG, búsqueda de ideas para mejorarlo. Se estima que en esta actividad se dedican 35 horas.

- T2: Búsqueda de información sobre la criptografía clásica y moderna para poder tener una base de la criptografía. Se estima que en esta actividad se dedican 35 horas.

-T3: Estudio de las normas APA 7º Edición para documentar el proyecto. Se estima que en esta actividad se dedican 7 horas.

-T4: Estudio del concurso NIST, especialmente de los algoritmos kem, cuya documentación se puede encontrar en la página oficial como también la de los algoritmos en sus páginas oficiales. Se estima que en esta actividad se dedican 105 horas.

-T5: Instalación de Linux, de librerías como Openssl y libcekac para el funcionamiento de los algoritmos. En esta tarea se perdió tiempo ya que en Windows no era tan asequible compilar y ejecutar los programas de los algoritmos ganadores, ya que había falta de compatibilidad como diversos fallos de reconocimientos de librerías necesarias. Se estima que en esta actividad se dedican 105 horas.

- T6: Obtención de los datos de la prueba, comprimidos para luego poder ser visualizados o comparados. Se estima que en esta actividad se dedican 24 horas.

- T7: Tutorías con el tutor. Se estima que en esta actividad se dedican 10 horas.

-T8: Redacción del proyecto. Se estima que 75 horas.

Coste de programador y analista de documentación: Se ha propuesto que hay

dos tipos de trabajadores en este proyecto el programador y analista de documentación. El programador es el que se encarga de ejecutar las tareas en Linux, como la configuración de las librerías, programas y demás, sin embargo, el analista de documentación es el que se encarga de redactar la información obtenida por el programador como a su vez del documento de entrega, citas, cumplimiento de normas APA etc.

Con la suma de las horas obtenidas entre las tareas citadas en este punto se reparten de la siguiente manera:

T1+T2+T3+T4+T5+T6+T7+T8= 35+35+7+105+105+24+10+75 = 396 horas.

Las tareas son dedicadas exclusivamente por un empleado. El programador se encarga de realizar T5 y T6, por lo tanto, dedica 129 horas. El analista se encarga de realizar T1,T2,T3,T4,T7,T8, por lo tanto, dedica 267 horas.

Repartición de tareas:

Tarea	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Programador					X	X		
Analista	X	X	X	X			X	X

Cargo	Horas estimadas	Coste euros-hora	Coste total euros
Programador	129	15	1935
Analista	267	12	3204
Total	396		5139

Lo siguiente a tratar es el coste del software utilizado en el proyecto:

Componente software	Coste sin I.VA(euros)	Coste con I.VA(euros)	Tiempo usado (horas)	Tiempo de licencia(año)
Microsoft Office	54,51	69	75	1
Oracle VM	Gratuito		129	
Windows 10 Programas	94,8	120	281	Indefinida
Spyder IDE	Gratuito		50	75
Codeblocks	Gratuito		55	Indefinida
Github	Gratuito		2	Indefinida

Lo siguiente a tratar son los costes técnicos: internet, luz, etc, no supera los 30 euros.

Si la planificación inicial se suponía que iba a ser 300 horas, esto indicaría que las horas del programador estarían en torno a las 85 y las del analista en 215.

Esto se indicaría aquí:

Cargo	Horas estimadas	Coste euros-hora	Coste total euros
Programador	85	15	1275
Analista	215	12	2580
Total	300		3855

Esto indicaría que el costo de personal planificado en un principio alcanza los 3855 y el costo de personal real alcanza 5139, una variación de 1284 euros de más

gastados debido al aumento de horas. El coste total del proyecto asciende a la suma del coste de personal, software y técnicos: 5139 + (69 + 120) + 30 = 5358 euros.

Capítulo 2

Historia y conceptos de la criptografía.

2.1 Antecedentes históricos

El primer indicio de métodos que permitiesen el cifrado de mensajes procede de Grecia, alrededor del siglo VI antes de Cristo, cuyo nombre se conocía como escítalo.

El escítalo consistía en una vara en la cual era rodeada por un pergamino. El mensaje era colocado en el pergamino de forma horizontal pero una vez que se desenrollaba se mostraba de forma vertical, esto hacía que el mensaje no fuese fácil de visualizar. El siguiente indicio importante fue en Roma por los ejércitos romanos el llamado Cifrado Cesar. El Cifrado Cesar, fue como se ha comentado previamente una herramienta para mantener seguros los mensajes en la guerra. El cuál consistía en un cifrado de sustitución el cual cada letra era desplazada un número fijo de posiciones. Por ejemplo, si la letra era la "A" y el desplazamiento era 4, la letra que se mostraba era la "E", para descifrar el mensaje habría que hacer lo mismo, pero al revés. (Xifré Solana, 2009)

En el imperio árabe podemos destacar a Al-Kindi (801-873) fue conocido como el filósofo, intelectual, matemático más famoso musulmán. Su libro más famoso redescubierto en 1987 llamado "Sobre el desciframiento de mensajes criptográficos". En el siglo XIX Thomas Jefferson inventó un mecanismo de cifrado que consistía en un aparato formado por diez cilindros los cuáles están colocados en un eje de forma independiente, en esta posición se colocaba el alfabeto y al girar estos cilindros el mensaje a cifrar ya era cifrado.

En la Primera Guerra Mundial (1914-1918) los mensajes eran enviados por los soldados

a las zonas de guerra, esto hacía que fuese difícil trasladar la información a zonas conflictivos con lo cual se empezó a usar tecnología como teléfono y la radio. Aun así, esto hacía que fuese asequible interceptar esta información. El siguiente paso en los años siguientes en la criptografía fue el cambio por las denominadas maquinas criptográficas como puede ser la famosa "Enigma" usada por la Alianza contra el ejército nazi, en Estados Unidos poseían SIGABA, en Japón poseían Purple. En 1948-1949 dos artículos redactados por Claude Shannon, "Teoría Matemática de la Comunicación" y "La Teoría de la Comunicación de los Sistemas Secretos". A partir de la Segunda Guerra Mundial inició la nueva era de la criptografía electrónica, se puede considerar que los avances en criptografía más destacados de estos años eran la Guerra Fría. En 1975 IBM creó el DES (Data Encryption Standard) conocido en el castellano como el Estándar de Encriptación de Datos, que se sigue usando en la actualidad. En 1976 W. Diffie y M. Hellman sucedió un suceso muy importante el cuál fue la creación de la clave pública, esto consistía que la clave de cifrado pertenece a un directorio público, sin embargo, la clave de descifrado es distinta. En 1978 R. L. Rivest, A. Shamir y L. Adleman los cuáles pertenecían al MIT crearon el criptosistema de clave pública más usado hasta la fecha el RSA. . (Xifré Solana, 2009)

Se procederá a hacer un resumen de métodos específicos de cifrado a lo largo de la historia:

Criptografía clásica:

- Civilización Egipcia: De la civilización egipcia podemos destacar la escritura jeroglífica la cual está compuesta por caracteres ideográficos combinándolos con caracteres fonéticos los cuales representan uno o varios sonidos. Podemos destacar cuatro características de estos:

1- Dimensión: La proporción de los signos no se corresponde con la realidad.

Figura 2.1 Dimensión según la civilización egipcia.

(Domenech Belda, 2004)

2- Direccionalidad: Puede escribirse de horizontal a vertical o al revés, además de izquierda a derecha y al revés. Eso hace que haya 4 orientaciones posibles.

Figura 2.2 Direccionalidad según la civilización egipcia.

(Domenech Belda, 2004)

3- Disposición: Los signos no se encuentra alineados uno con otro, si no que se agrupan en un cuadrado imaginario en el que se ahorra un espacio grande, esto hace que no haya espacios en blanco.

Figura 2.3 Disposición según la civilización egipcia.

(Domenech Belda, 2004)

4- Pronunciación: Este tipo de escritura es consonántica, es decir no se posee vocales. Los egiptólogos decidieron añadirle una vocal e al resto de consonantes para poder leerlas.

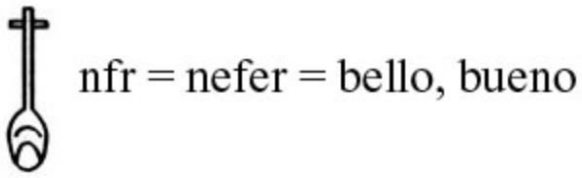


Figura 2.4 Pronunciación según la civilización egipcia.

(Domenech Belda, 2004)

- Civilización Romana: De la civilización romana podemos destacar cuatro criptosistemas el cifrado de césar, cifrado de sustitución, cifrado del grano de trigo y las escítalas.

En primer lugar, el cifrado de césar consiste básicamente en desplazar las letras x posiciones.

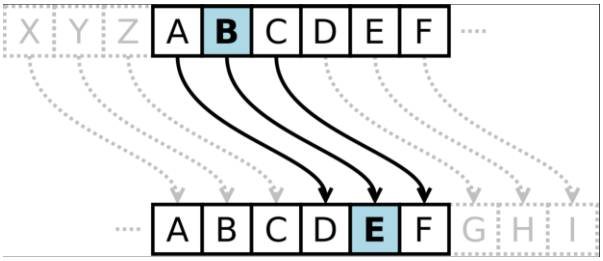


Figura 2.5 Cifrado César.

(Museu Informática, 2021)

El cifrado de sustitución se compone de dos tipos: sustitución monoalfabética y polialfabética. Este cifrado consiste en cambiar una letra por otra en todo el texto.

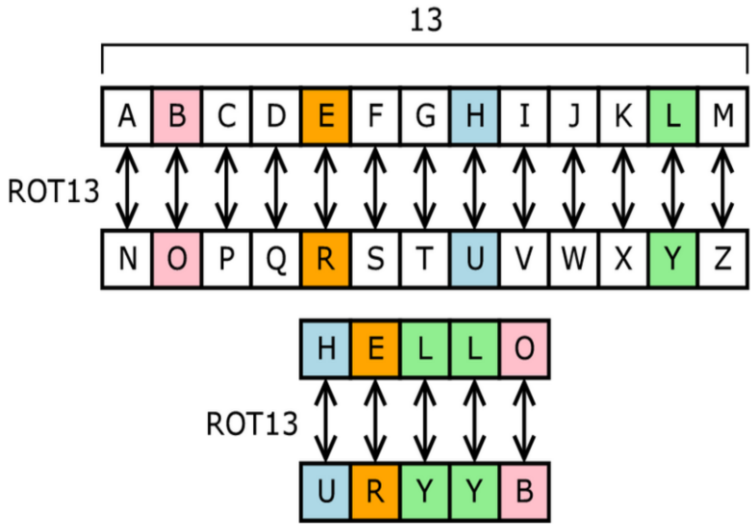


Figura 2.6 Cifrado de sustitución.

(Tecnología + Informática, 2021)

Las escítalas eran unas varillas cilíndricas en la que se enrollaba un pergamino en el cual el mensaje se escribía en espiral a lo largo de la varilla y al desenrollarla se mostraba.

Figura 2.7 Ejemplo de escítala.

(Gutiérrez, 2012)

Por último, el cifrado de grano de arena consistía en escribir el mensaje en granos de trigo colocados de forma de cuadrado, el mensaje era revelado una vez los granos se dispersaban.

- Civilización Mesopotámica: En el año 3300 A.C. apareció la escritura cuneiforme . Los signos cuneiformes representaban o letras, palabras o sílabas, esto se leía de izquierda a derecha. A veces como los egipcios cambiaban signos cuneiformes por , sin embargo, tenían intención de ocultar el significado de la escritura a diferencia de los egipcios. (Xifré Solana, 2009)

- Civilización Griega: De la civilización griega podemos destacar dos cifrados, el cifrado de Esparta y el cifrado de Atbash.

El cifrado de Esparta era un cifrado basado en la transposición. Básicamente consistía en escribir el mensaje en columnas y leerlo en filas.

El cifrado de Atbash consistía en un cifrado por sustitución en el que sustituye la letra por su opuesta en el alfabeto. Por ejemplo. La A por la Z, la B por la Y.

Cifrado Atbash

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Z	Y	X	W	V	U	T	S	R	Q	P	O	N	M	L	K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A

Figura 2.8 Cifrado Atbash.

(Castellanos, 2017)

En 1500 A.C se conserva una tablilla de arcilla en la que se escribió una fórmula en barniz, se considera un tesoro de esa edad.

2.2 Cifrado de clave pública.

Este tipo de cifrado usa un par de claves relacionadas entre sí. La información cifrada con la primera clave tiene que desencriptarse/descifrarse con la segunda clave, y la información cifrada con la segunda clave debe desencriptarse/descifrarse con la primera clave .Los participantes en el sistema de clave pública tienen dos claves. Una de ellas es clave privada y es secreta, en cambio la otra es enviada a todo el mundo que quiera, esta va a ser la clave pública. Todos los participantes pueden encriptar/cifrar usando su clave pública, pero solo el usuario puede visualizarlo. Cuando el usuario lo recibe, puede desencriptarlo/descifrarlo con la clave privada. Un mensaje que se quiere cifrar se puede utilizando su clave pública y descifrar con su clave privada. Una vez que se cumplen estas condiciones el mensaje se puede enviar de forma segura mediante un canal no seguro. (IBM, 2021)

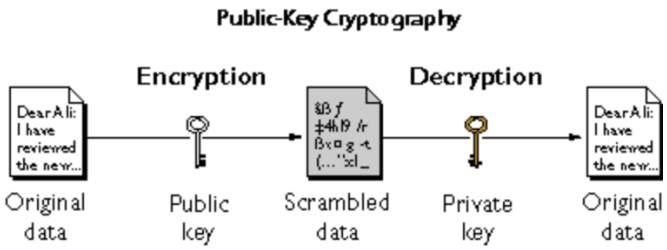


Figura 2.9 Esquema cifrado de clave pública.

(IBM, 2021)

Características de la clave pública:

- Este tipo de cifrado hace que cada participante tenga dos claves.

- Cualquier participante que sepa la clave pública puede enviar el mensaje, pero solo el usuario podría visualizarlo.

- La forma de mantenerse seguro es mantener la clave privada en secreto.

- También es llamado cifrado asimétrico, esto es porque no se puede usar la misma clave para cifrar y descifrar.

- En el cifrado de clave pública, cualquier usuario puede crear dos claves y compartir la clave pública. Surge un dilema a la hora de poder comprobar la identidad del creador de la clave pública, ya que este usuario crear las claves públicas con un nombre falso. El creador de la clave pública no puede visualizar los mensajes cifrados por esa clave ya que no tiene la clave privada. El usuario anteriormente citado si tiene la posibilidad de interceptar los mensajes anteriormente citados, le permitiría descifrar y visualizar mensajes que iban dirigidos a otro usuario. (Real Casa de la Moneda, s.f)

Infraestructura de claves públicas: La infraestructura de claves públicas también llamada PKI es la infraestructura que gracias a las tecnologías de clave pública facilita que las aplicaciones se comuniquen de forma segura, esto da seguridad. En la realidad una pequeña cantidad de información es cifrada de esta manera. PKI usa la clave privada para que la aplicación pueda firmar documentos. Para el receptor pueda autentificar al emisor, se debe obtener la clave pública del emisor, esta clave se obtiene

de un certificado digital, que es vigilado por una entidad emisora de certificados de terceros que sea fiable. (IBM, 2021)

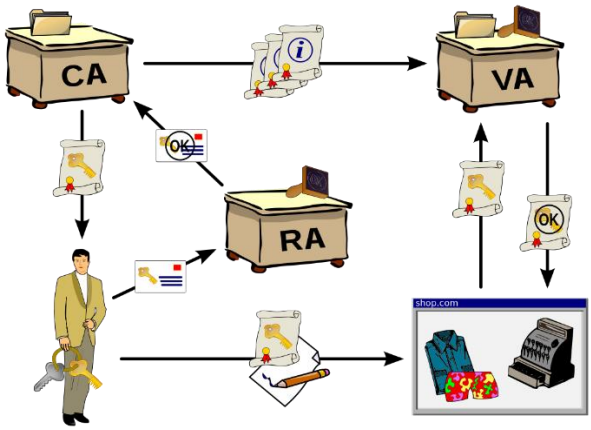


Figura 2.10 Infraestructura de clave pública. (Wikipedia, 2022)

2.3 Cifrado de clave privada.

Este tipo de cifrado consta solo de una clave, la cual compartirán el emisor y el receptor. El funcionamiento es simple, para cifrar el mensaje el emisor utiliza la clave y para descifrar el mensaje del receptor utiliza también la clave.

Esta clave debe no compartirse para poder garantizar seguridad en el envío.

Figura 2.11 Cifrado de clave privada. (Moreland, 2022)

Características de la clave privada:

- Las claves deben ser enviadas a todos los participantes ya que la necesitan para cifrar y descifrar. Esto hace que sean más vulnerables a ser robadas.

- Este cifrado necesita que haya una clave por emisor y receptor si desean enviar información de forma privada. El número de claves aumenta si se aumenta el número de participantes.

- Se necesita un acuerdo o un pacto para mantener comunicaciones entre ellos. No pueden enviar información a alguien al azar.

(IBM, 2021)

2.4 Cuerpos finitos.

Un cuerpo K es finito una vez que posee un numero finito de elementos. Los cuerpos finitos también son conocidos como cuerpos de Galois, esto sucedió en honor a Évariste Galois, matemático del siglo XIX, su contribución más destacada es la teoría que lleva su apellido, además del estudio de los grupos y cuerpos algebraicos. Los cuerpos y grupos algebraicos son fundamentales para entender el funcionamiento de

los algoritmos clásicos, curvas elípticas… (Raposo Briceño, 2019)

La teoría de Galois: Uno de los problemas que surgió en la antigüedad en el campo del algebra, es buscar soluciones en una ecuación polinomial. Los polinomios de grado 2 ya tenían soluciones en la antigüedad, en el siglo XVI hubo soluciones para polinomios de grado 3 y 4. Sin embargo los polinomios de grado 5 durante más de 300 años no se podían solucionar. Alrededor del siglo XIX, Galois fue el indicado de mostrar que polinomios podían ser resueltos y cuáles no. Básicamente esta teoría muestra que hay una gran independencia entre la teoría de grupos y la de cuerpos. (Judson, 2017)

Demostraciones:

- Un cuerpo finito tiene una característica llamada p, la cuál es un numero primo. Si tenemos un cuerpo K el cuál es finito que posee n elementos, p será un divisor de n, lo cual hace que nk = 0 para todo $k \in K$.

- Si K es un cuerpo finito que posee una característica llamada p que es un número primo. Esto conlleva a que el orden de K es p^n para cierto natural n distinto de 0. (Raposo Briceño, 2019)

Construcción de un cuerpo finito:

- Sea K el cuerpo de escisión (consiste en el campo de extensiones de menor tamaño que contiene las raíces del polinomio) del polinomio f(x) = x^{p^n} - x ∈ Z_p. (Raposo Briceño, 2019)

Ejemplo de teorema:

- El polinomio x^{q^n} - x ∈ F_q es el resultado del producto de todos los polinomios

irreducibles cuyo grado divide a n. (Raposo Briceño, 2019)

2.5 Compartición de secretos.

En la criptografía clásica, en la criptografía de clave privada y pública solo había dos participantes: el emisor y el receptor. Sin embargo, en la criptografía moderna el avance de las redes, y la obligación de mantener seguridad y privacidad de la información. Esto hace que la información mediante el uso de protocolos hace que haya más participantes. La información secreta no es creada para solo personas físicas, sino también para empresas y entidades. Esto hace que no esté muy claro si la información ha de caer solo en una persona si no en varias. Un esquema para compartir secretos es un protocolo criptográfico, el secreto se divide en diversas personas para mantenerse seguro. La división del secreto entre los participantes debe cumplir:

- Solo hay ciertos participantes que pueden volver a construir el secreto original.
- Los participantes no autorizados no pueden obtener información del secreto original.

El secreto final no consiste en unir los fragmentos de cada participante, sino en ejecutar un algoritmo cuya entrada van a ser los fragmentos anteriores. En 1979 Shamir y Blackley fue el primero en crear los primeros esquemas para la compartición de secretos. Un algoritmo debe ser robusto ante personas externas. El ejemplo más significativo es en el que un participante del esquema tendría la capacidad de engañar a otros participantes, dándoles información falsa, como consecuencia un secreto erróneo. El inconveniente del algoritmo Shamir consiste en que el participante que quiere hacer trampa con un mensaje correcto y un secreto incorrecto podría recuperar el secreto original. Para las votaciones electrónicas también se usa la compartición de

secretos, cuando se procede a abrir la urna tiene un código que se reconstruye con la clave secreta que ha sido compartida a los miembros de la sala. La compartición de secretos ofrece una seguridad incondicional, pero también hay un tipo que es menos estricto llamado seguridad computacional segura, de la cual se debe cumplir lo siguiente:

- Algunos participantes autorizados pueden volver a construir el mensaje.
- Los participantes no autorizados no tienen la capacidad de obtener información sobre el secreto original.

  (Villar Santos y otros, s.f)

2.5.2 Algoritmo Shamir.

Para tratar sobre el algoritmo de Shamir se va a considerar un conjunto de participantes P= $\{P_1,P_2,...,P_n\}$ y un entero al que vamos a llamar t el cual está dentro de este dominio $1 \leq t \leq n$. El conjunto de secretos va a consistir en un cuerpo finito, el cual lo vamos a llamar Z_p, la p va a consistir en un número primo. P debe ser mayor que el número de participantes.

En la primera fase del algoritmo se le proporcionara a cada participante un elemento x_i que pertenece al cuerpo Z_p. Los valores de x_i son no nulos y diferentes cada uno de ellos. La distribución del secreto llamado $s \in Z_p$ se lleva a cabo mediante la toma de un polinomio al azar menor o igual que t-1, que r(x) => r(0) = s. El participante recoge como fragmento $s_i = r(x_i)$. Se necesita mantener en secreto tanto al valor del secreto como al coeficiente del polinomio, de esto se encarga el distribuidor D.

El algoritmo de Shamir es incondicional, ya que, aunque el individuo que quisiera romperlo tuviese una capacidad computacional ilimitada no podría obtener el secreto aun conociendo t-1 fragmentos.

Posee propiedades homomórficas, en algunos esquemas de compartición de secretos hay posibilidad de realizar operaciones simples sobre secretos, sin tener que volver a construirlos otra vez.

Un esquema para compartir secretos es homomórfico sobre Z_p, esto sucede si cada participante que hay P_i tiene la posibilidad de combinar los fragmentos $S_i^{(a)}$ y $S_i^{(b)}$ los cuales han sido recibidos por los secretos $s^{(a)}$ y $s^{(b)}$, si se quiere obtener un nuevo fragmento del secreto hay que sumar $s^{(a)} + s^{(b)}$. (Villar , 2017)

2.6 Firma digital.

Es el concepto que engloba a los datos asociados a un mensaje, el cual permite mantener segura la identidad del usuario que firma. La firma digital no implica que el mensaje sea cifrado, es decir, el mensaje que ha sido firma es descifrable si está cifrado o no. El usuario que se encarga de firmar mediante el uso de una función generara la huella digital. Esta huella digital se cifrará con la clave privada propia y esto generara la firma digital, esta va a ir adherida al mensaje original.

El receptor del mensaje a su vez puede comprobar si el mensaje no ha sido modificado utilizando la misma función que antes para generar la huella digital que se encuentra adherida al mensaje. Se puede verificar su autenticidad, descifrando la firma con la clave pública del que firma, esto genera la huella digital.

Los algoritmos de clave pública generan algunos inconvenientes ya que son lentos, y aumentan con el tamaño del mensaje que se quiere cifrar. Para esto la firma digital utiliza funciones hash.

Ejemplo de firma digital:

- Ana y Carlos tienen cada uno su clave.
- Ana formula un mensaje para Carlos. Carlos debe comprobar si es Ana la que está enviando el mensaje, mediante 3 pasos: Utiliza una función hash para reducir el mensaje, cifra el resultado de la función hash el cual hace obtener la firma digital, y por último se envía a Carlos el mensaje con la firma adherida.
- Carlos ya ha recibido el mensaje con la huella digital. Se comprueba la validez del mensaje y reconocer al creador del mensaje, esto se hace mediante 3 pasos: descifrar el resumen del mensaje con la clave pública del emisor es decir Ana, se aplica al mensaje la función hash esto hace obtener el resumen del mensaje, se compara el resumen recibido con el que ha salido del resultado de la función hash. Si son iguales, el mensaje es seguro que lo ha enviado Ana.

La firma digital permite las 3 siguientes características:

- Autentificación.
- Imposibilidad de negar que se ha enviado el mensaje por el usuario.
- Integridad.

(Real Casa de la Moneda, s.f)

2.6.1 Firma digital RSA.

En 1977, fue mostrado al mundo el algoritmo RSA, de la mano de Rivest, Adleman y Shamir. Es el ejemplo de clave pública más usado del mundo. El éxito de este criptosistema radica en la dificultad a nivel computacional de resolver la factorización de números enteros. La

factorización de números enteros se basa en un numero entero llamado n, y se intenta localizar la descomposición como producto de factores primos. Es un problema si el numero n no tiene factores pequeños.

Para generar la clave pública se tiene que considerar que n = p . q, p y q serían números primos de alto valor.

El algoritmo RSA consta de 3 partes:

- Obtención de claves:

  Todos los usuarios S tienen que elegir sus claves públicas y privadas.

  S elige dos números de gran valor que van a ser p y q. Se procede a calcular su producto, es decir, n = p . q, la colección de mensajes que usa el usuario S es el grupo multiplicativo. La cantidad de elementos del grupo es $\phi(n)$, ϕ es el indicador de n.

  $\phi(n)$ se calcula mediante la siguiente fórmula: $\phi(n) = \phi(p \,.\, q) = (p-1)(q-1)$.

  Si el usuario S elige un número entero llamado e, que se encuentra en el siguiente intervalo $2<e<\phi(n)$, esto hace que mcd (e, $\phi(n)$) = 1.

  El usuario S va a calcular d, es decir, el inverso de e módulo $\phi(n)$, esto comprueba que $1 < d < \phi(n)$, además de $e \,.\, d \equiv 1 \bmod (\phi(n))$.

  Con estos pasos ya se conocen la clave pública, n, e y la clave privada que va a consistir en el valor de d.

- Cifrado del mensaje: Suponemos que tenemos dos usuarios Ana y Carlos, los cuáles quieren comunicarse con un mensaje que vamos a llamar m, está escrito en el alfabeto A y mediante una función llamada mensaje numérico

pueden convertirse en un entero. Carlos es el que va a enviar el mensaje a Ana. Se deben seguir los siguientes pasos:

Carlos pregunta la clave pública de Ana, es decir (nA,eA) es el par que es parte de la clave pública de Ana.

Carlos va a asignar el mensaje como un elemento Z_n, el rango al que pertenecerá el mensaje es el siguiente {0,1, 2, …, nA-1}, también tiene que ser primo de nA. A veces hay que dividir en diferentes y pequeños trozos el mensaje m para que sea menor que nA si no lo es.

Carlos calcular el valor del criptograma con la siguiente función

$c = m^{eA}(\text{ mod } nA)$, el cuál va a ser enviado a Alicia.

- Descifrado del mensaje: Alicia recibe el criptograma de Carlos, si se desea recuperar el mensaje original se deben seguir los siguientes pasos:

  Ana utiliza su clave privada dA y utiliza la siguiente función en todos los elementos del criptograma, para poder recuperar el mensaje.

  $C^{dA} \text{ mod } n_A = (m^{eA})^{dA} \text{ (mod } n_A) = m^{eAdA}(\text{mod } n_A) \equiv m \text{ (mod } n_A)$

  (Giematic , s.f)

2.6.2 Firma digital ElGamal.

La firma digital ElGamal fue creada por Taher ElGamal en el año 1984. Se va a usar el mismo ejemplo de Alicia y Carlos.

- Alicia debe crear un número aleatorio llamado a que cumpla:

  mod (l, p-1) = 1.

- Alicia también debe calcular el elemento que vamos a llamar e,

  $e \equiv a^l(\text{mod } p)$.

- Alicia debe resolver la siguiente congruencia: $m \equiv a \cdot e + l \cdot s \pmod{p-1}$.

  La firma digital está formada por el par (e, s).

- Carlos debe comprobar el mensaje m, para ello debe seguir los dos siguientes pasos: Carlos calcula $e^s \equiv (a^l)^s \pmod{p}$, además de:

  $(a^a)^e \pmod{p}$.

- A su vez, Carlos debe calcular $(a^a)^e \cdot (a^l)^s \pmod{p}$, luego hay que comprobar el resultado anterior si es igual a $a^m \pmod{p}$.

  (Xifré Solana, 2009)

2.7 Cifrado de bloque.

Es un cifrado de tipo de clave simétrica, cuya función consiste en dividir el mensaje en bloques (unidades de tamaño fijas), para posteriormente aplicarles un cifrado en específico a cada una. Este tipo de cifrado consume mucho a nivel computacional debido a que hay que guardar archivos en memoria y por usar operaciones complicadas. Actualmente un cifrado de bloque de 64 bits con operaciones convencionales no puede ser seguro y es vulnerable a ataques.

Hay 4 funciones básicas en este tipo de cifrado:

- Difusión: Es la difusión del impacto de un bit con formato de texto simple a numerosos bits de texto cifrado. Todo esto se hace para ocultar la estadística de texto simple. Se usan las Cajas P-Box.
- Confusión: Es un cambio, el cual tiene como función cambiar la relación entre las estadísticas del texto plano a las del texto cifrado, todo esto tapando la relación entre clave y el mensaje que se ha cifrado. Se usan las Cajas S-Box.

- Expansión de claves: Se utiliza la puerta XOR a la clave y la información del mensaje, para obtener una nueva. Si el tamaño de la clave no es igual al tamaño de bloque hay que expandir, no replicarla para que los cálculos sean más simples y el algoritmo sea productivo.
- Rondas: Los dos primeros conceptos que hemos tocado: la difusión y confusión, son un éxito cuando se usa cifrados iterados, en estos cifrados se pueden unir las cajas-S y las cajas-P con otros elementos.

(Numerentur Org, s.f)

Características:

- Mayor tamaño de bloque conlleva a que sea menos rápido, pero más seguro.
- Si hay más rondas hay más seguridad.
- Mayor tamaño de bloque conlleva a que sea menos rápido, pero más seguro.
- Mayor nivel de complejidad de las subclaves, conllevan a un alto nivel de complejidad del criptoanálisis.
- Mayor nivel de complejidad de las rondas, conllevan a alto nivel de complejidad del criptoanálisis.

  (Numerentur Org, s.f)

Tipos de cifrado:

- Feistel: Se fracciona un bloque de texto en dos o más partes. Posteriormente se usan operaciones en estas. Ejemplos: DES,3DES, RC5…
- No Feistel: Se transforma los bloques de texto mediante números rondas

diferentes y subclaves. Como se comentó anteriormente se realizan operaciones S-Box y P-Box. Ejemplos: AES, SHARK, SQUARE…

(Numerentur Org, s.f)

2.8 Vernam.

También denominado cifrado de flujo y fue creado por Gilbert S. Vernam en el año 1917. El algoritmo permite relacionar un texto con una clave de un mismo tamaño lo cual hace que se cree un criptosistema eficiente, el cuál si se utilizase una clave al azar haría que fuese más seguro. El cifrado consiste en transformar cada carácter del texto en una cadena binaria. Esta cadena es transformada por una puerta XOR bit a bit con una clave aleatoria generada por un algoritmo, es decir parece aleatoria pero no lo es. Todo esto se puede resumir en asignar n bits los cuáles son sumados por la puerta XOR mod 2 con una clave.

La función que representa todo esto es la siguiente:

$C_i = M_I \oplus K_i$ para i = 1,2, …, n. Esto es para el cifrado.

$C_i \oplus K_i = M_i \oplus K_i \oplus K_i$. Esto es para el descifrado.

M_i son los n bits de cada carácter del texto, K_i la clave y C_i el mensaje cifrado. (Urrego Urrego, 2019)

2.9 Criptografía post-cuántica.

La criptografía post-cuántica es aquella que engloba algoritmos, criptosistemas y protocolos criptográficos que de momento son invulnerables por la criptografía cuántica. Al hablar de criptografía post-cuántica hay que hablar sobre la factorización de enteros y el problema del logaritmo discreto.

- Factorización de enteros: RSA, y KMOV que es usado en cuerpo elípticos.
- Logaritmo discreto: Podemos destacar ElGamal y firma digital (DSA) de los que se hablaran más adelante, y el intercambio de claves del protocolo Diffie-Hellman.

(Farrán, 2016)

2.9.1 Basado en teoría de códigos correctores de errores.

En la actualidad estos algoritmos no han reflejado vulnerabilidades a ataques cuánticos, esto hace que se una de las áreas más prometedoras en la criptografía cuántica.

La investigación en este tipo de área viene dada por las convocatorias de estandarización post-cuántica del NIST.

El objetivo de este concurso es abrir al mundo estas áreas, dar charlas informativas, invitaciones de individuos conocedores de estos algoritmos.

(Farrán, 2016)

2.9.2Basado en retículos.

Para explicar porque se debe tratar la criptografía basada en retículos

Debemos explicar las características y las razones de su estudio:

- Este tipo de criptografía es bastante fácil de comprender y de implementar.

- Son unos candidatos ideales para la criptografía post-cuántica ya que

no hay algoritmos cuánticos que resuelvan retículas que funcionen de mejor manera que los cásicos.

- Han provocado grandes avances en la criptografía homomórfica (capacidad que permite trabajar con información cifrada sin tener que descifrarlos)

Estos tienen una complejidad computacional menor para cifrar y descifrar que los criptosistemas famosos.

(Farrán, 2016)

2.9.3 Basado en isogenias de curvas elípticas.

Esta área de la criptografía es relativamente joven ya que surgió en la década de los 2000. Deriva de la criptografía de curvas elípticas la cual pertenece al área de clave pública, la criptografía de curvas elípticas surgió en 1980 cuando Miller y Koblitz convencieron de usar curvas elípticas en el protocolo de intercambio de claves de Diffie-Hellman.

En la década de 1990 gracias al algoritmo de Schoof facilitase localizar curvas elípticas de orden primo grande permitió un gran avance.

En la década del 2000 hubo dos innovaciones importantes en la criptografía en curvas elípticas:

-Aparición de la criptografía basada en parejas como es el intercambio de claves de Diffie-Hellman. Permite el intercambio entre ambas partes sin compartir la clave secreta.

- La criptografía basada en isogenias fue inicia por Couveignes, Teske, Rostovtsev y Stolbunov. Mientras la criptografía basada en parejas tuvo mayor apogeo la criptografía basada en isogenias. Hasta la segunda parte de la década

> del 2010, en el que este tipo de criptografía tomo importancia debido del miedo de la inminente llegada del ordenador cuántico de uso general.
>
> (Farrán, 2016)

2.10 Influencia de la criptografía cuántica en criptomonedas.

La conexión entre la criptografía y las criptomonedas es un tema que llama mucho la atención actualmente debido a que al ser las criptomonedas una moneda para realizar pagos interesa que esos pagos se realicen de forma segura.

La inclusión de Taproot en Bitcoin hico que la red de Bitcoin fuese más privada y segura. Una de las funcionalidades que permite esto es que no se pueda diferenciar entre transacciones de firma única y firma múltiple, esto indica que no hay posibilidad de verificar que tipo de transacciones involucra la apertura de canales de Lightning Network con las transacciones en la capa base. Con la evolución de los nuevos ordenadores cuánticos indica que se va a tener que modificar las técnicas criptográficas de las Blockchain. El Dr. Joel Alwen, cuyo puesto es criptógrafo jefe de Wickr, una de las mejores aplicaciones actuales de mensajería que utilizado cifrados para los mensajes indicó las siguientes premisas, las cuáles tiene una visión general del tema:

- Los ordenadores cuánticos actuales no están todavía preparados para romper los estándares de cifrado actuales. El avance actual no es muy significativo.

- Se necesita diálogo entre expertos en computación cuántica y cifrado para llegar a un consenso común y evolucionar en el tema. Retracta que no hay suficiente comunicación entre estos expertos, por lo tanto, el avance de la computación cuántica es más lento que el del cifrado.

Hay países con China que no han revelado prácticamente ningún avance en el

sector eso hace que se crea que los avances son ocultados para no mostrar los verdaderos conocimientos en este sector que se tiene.

Todos estos factores indican que no habrá mucho avance a no ser que haya colaboración.

(Huang, 2021)

Capítulo 3

Criptografía general

En este apartado se va a tratar ejemplos que van a ayudar a comprender diferentes términos y técnicas importantes en la criptografía.

Se introducirán términos como la clave pública, cuerpos finitos, AES, Des, compartición de secretos, firma digital y por último se concluirá con los cifrados de bloque.

3.1 Seguridad en la computación post-cuántica.

Actualmente los cifrados que se encuentran en la red la mayoría utilizan la clave pública y privada. Teóricamente los ordenadores cuánticos tienen la capacidad de quebrar estos tipos de cifrado, actualmente no pueden quebrarlos debido a que se utilizan claves muy extensas y se carece de muchos qubit, en un futuro se prevé que podrán quebrarlos con el avance de la tecnología, además de que se podría usar este tipo de computación para simulaciones en física, aeroespacial entre otras.

Por eso se crearon tipo de competiciones como la de NIST de criptografía post-cuántica para prevenir y crear algoritmos post-cuánticos que sean resistentes a ataques de ordenadores cuánticos.

El proceso para verificar la seguridad de este tipo de algoritmos es la siguiente:

- Se diseñan los sistemas para cifrar y descifrar.
- Se pone a prueba este tipo algoritmos.
- Se implementan los algoritmos más rápidos.

Lo que se está haciendo actualmente para protegerse de este tipo de ataques cuánticos es aumentar el tamaño de las claves, ya que esto hace que el ordenador cuántico le cueste descifrarlo.

Se considera que las claves cuya longitud es 256 bits son prácticamente seguras, pero en un futuro se supone que no lo llegaran a ser y habrá que buscar formas nuevas para protegerse.

Para RSA se recomienda que sea de 2048-4096 bits, las implementaciones de RSA que utilizaban 768-1024 bits ya fueron quebrantadas en 2010.

Se estima que en 20 años ya un ordenador cuántico podrá romper los grandes criptosistemas actuales.

Actualmente existen varios algoritmos de cifrados resistentes a los ordenadores cuánticos, pero no son visibles a gran escala por el tiempo y espacio que ocupan, hay que generar una confianza al usuario y eso lleva tiempo, necesitamos realizar muchas pruebas para asegurarnos de que el producto es bueno y seguro, eso quiere decir que no genere contratiempos en un futuro.

(Orange, 2022)

3.2 Computación cuántica y clásica.

Se procederá a hacer una introducción de cada una para luego para terminar diferenciando una de otra.

Computación clásica: Los computadores clásicos se rigen mediante el uso de bits que pueden tomar dos estados: 0 y 1. Esto quiere reflejar que una computadora de N bits hace que la información que contiene es N en un estado concreto.

Si se aumenta en 1 el número de bits, el resultado sería N+1, esto hace que cambie de N a N+1.

(Salas Peralta & Sanz Sáenz, 2000)

Los ordenadores cuánticos utilizan puertas lógicas.

Computación cuántica: Los computadores cuánticos se rigen mediante el uso de qubit, esto hace que los estados no sean 0 y 1 si no ambos. Esto quiere reflejar que una computadora de N bits hace que la información que contiene es 2^N en un estado concreto.

Si se aumenta en 1 el número de bits, el resultado sería 2^{N+1}, esto hace que cambie de 2^N a 2^{N+1}.

Los ordenadores cuánticos utilizan puertas cuánticas esto hace que se hagan operaciones a un nivel óptimo y rápido.

(Salas Peralta & Sanz Sáenz, 2000)

3.3 Algoritmos cuánticos.

En este apartado se va a tratar de introducir a los cuatro algoritmos cuánticos más conocidos:

- Algoritmo de Shor: La función primordial de este algoritmo consiste en descomponer un número entero de gran tamaño en sus factores primos. Es un tipo de algoritmo cuántico de factorización. Presenta una ventaja exponencial (O ($\sqrt{N}$)). Se

puede utilizar para solucionar el problema del subgrupo escondido también llamado HSP. El HSP se soluciona con la paralelización cuántica, la cuál es una propiedad que tienen los ordenadores cuánticos de realizar diferentes cálculos al mismo tiempo, de las que podemos destacar el logaritmo discreto para un grupo cíclico finito llamado G y para la factorización de enteros para G = Z. El algoritmo Shor en ordenadores cuánticos ya establecidos podría romper algoritmos como el RSA y ECC. Este algoritmo está formado por dos pasos:

- El primer paso consiste en encontrar el período de una función el cuál es la longitud más pequeña de un intervalo, o coloquialmente la distancia que hay entre el eje x y dos puntos que se encuentran de forma sucesiva en los que la función posee un mismo valor y se trata de un patrón de repetición.

$$f(x) = f(x + T)$$

Figura 3.1 Fórmula para encontrar el período de una función.

- Esto indica que si le sumo un valor T a x la función tiene el mismo valor, en esto consiste el encontrar el período de una función.

Para la obtención del periodo se va a realizar una parte práctica para mostrar un ejemplo de la obtención:

- Se procede a escoger un número pseudoaleatorio (un número que parece aleatorio pero que no lo es, es generado por un algoritmo) que sea menor que N (número entero elegido previamente para el algoritmo Shor). El número pseudoaleatorio lo vamos a llamar y. y< N.

- Se procede a computar el máximo común divisor de N e Y.

Aquí puede haber dos soluciones:

mcd (y, N) es distinto a 1 es un factor no trivial de N.

Si es 1, debemos utilizar un subprograma para hallar x el periodo de la función explicado anteriormente en el primer paso.

- Si y es un número impar tenemos que volver a escoger un número pseudoaleatorio.

- Si $y^{x/2} \equiv -1 (\text{mod } N)$ tenemos que volver a escoger un número pseudoaleatorio.

- Los factores que tiene N son mcd $(y^{x/2} \pm 1, N)$.

El segundo paso consiste en encontrar un algoritmo cuántico para averiguar el período. Esto se realiza mediante la capacidad de un ordenador cuántico de estar en diferentes estados simultáneamente lo que es denominado como superposición cuántica. Hay que evaluar la función en todos los puntos de forma simultánea, esto la física cuántica no lo permite ya que una medición cuántica dará solamente un valor posible eliminando los demás, por lo tanto, tendríamos que buscar una forma de transformar la superposición a otro estado para que nos devuelva una respuesta correcta, para ello se utilizara la transformada de Fourier cuántica.

A continuación, se va a reflejar los pasos del subprograma para obtener el período.

- Inicializar dos registros de qubit de entrada y salida con $\log_2 N$ qubit cada uno.

$$N^{-1/2} \sum_{x} |x\rangle \, |0\rangle$$

(Wikimedia, s.f)

Figura 3.2 Fórmula para inicializar dos registros de qubit de entrada y salida.

El valor que recoge x es de 0 a N-1.

Se procede a construir f(x) para luego aplicarla al estado antedicho. El resultado es:

$$N^{-1/2} \sum_{x} |x\rangle \, |f(x)\rangle$$

(Wikimedia, s.f)

Figura 3.3 Fórmula f(x).

- Se aplica la transformada de Fourier cuántica a la entrada.

$$U_{QFT} \, |x\rangle = N^{-1/2} \sum_{y} e^{2\pi i x y / N} \, |y\rangle$$

Figura 3.4 Transformada de Fourier cuántica a la entrada. (Wikimedia, s.f)

-El resultado que nos deja el estado es:

$$N^{-1} \sum_{x} \sum_{y} e^{2\pi i x y / N} \, |y\rangle \, |f(x)\rangle$$

(Wikimedia, s.f)

Figura 3.5 Resultado del estado.

Se procederá a realizar una medición. Se obtiene un resultado y en el registro de entrada y f(x_0) en el registro de salida. F es periódica:

$$N^{-1} \left| \sum_{x:\, f(x)=f(x_0)} e^{2\pi i x y / N} \right|^2 = N^{-1} \left| \sum_{b} e^{2\pi i (x_0 + rb) y / N} \right|^2$$

(Wikimedia, s.f)

Figura 3.6 Medición.

Esto indica que hay mayor probabilidad cuando yr/N es un número casi igual a un número entero.

-Convertir y/N en una función irreducible, extraer r prima la cual es un candidato a ser r.

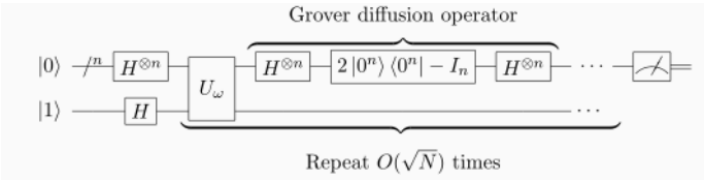
-Si f(x) = f (x + r prima) ya habremos acabado ya que r prima seria nuestra r.

- Si f(x) es distinto f (x + r prima), probar valores más cercanos a y, o múltiplos de r prima.

- Si no se encuentra ni uno tendremos que inicializar otro par de registros y volver a hacer todos los pasos otra vez.

(Wikimedia, s.f)

- Algoritmo de Grover: Consiste en un algoritmo creado en 1996 por Lov Grover. Es junto al algoritmo de Shor los primeros algoritmos cuánticos que resolvían un problema de una forma óptima que los clásicos. Lov Grover con este algoritmo consiguió encontrar el elemento optimo entre un conjunto de datos. Presenta una ventaja cuadrática(O(N)). Este algoritmo en concreto es usado para acelerar diferentes algoritmos, se ha demostrado aceleraciones en problemas de caja negra en la complejidad de la consulta cuántica, la distinción de elementos y el problema de colisión. (Hmong, s.f)



(Hmong, s.f)

Figura 3.7 Circuito cuántico con algoritmo de Grover.

Este algoritmo está formado por tres pasos:

- Inicializar el sistema de superposición uniforme en todos los estados que hay:

Hay que realizar una iteración Grover r(N) veces:

- Se debe aplicar el operador U_w

Se debe aplicar también el operador de difusión de Grover

Us = 2|s><s|-l.

|s> es el estado de superposición uniforme.

l consiste en la matriz de identidad.

|s> consiste en el estado.

Se debe medir para finalizar el estado cuántico resultante en la base computacional.

$$|s\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{x=0}^{N-1} |x\rangle.$$ (Hmong, s.f)

Figura 3.8 Estado cuántico.

Esta medición da un resultado que se aproxima al estado de mayor probabilidad.

(Hmong, s.f)

3.4 Puertas lógicas vs cuánticas.

- Computación clásica:

Para la computación clásica el manejo de los bits se realiza mediante puertas lógicas.

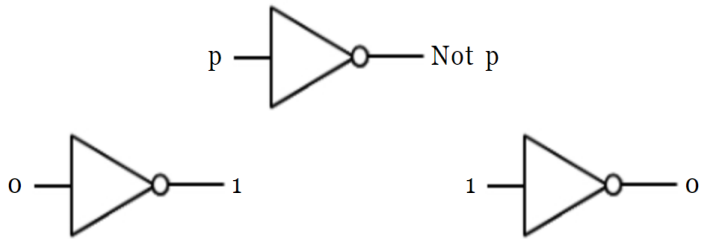
-Computación cuántica:

Para la computación cuántica el manejo de los qubit se realiza mediante

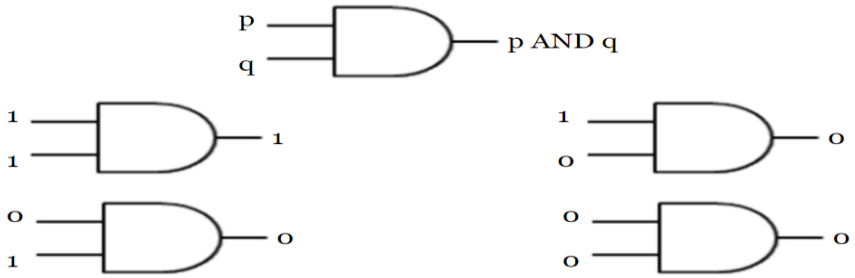
puertas cuánticas.

Estos son unos ejemplos de puertas lógicas:

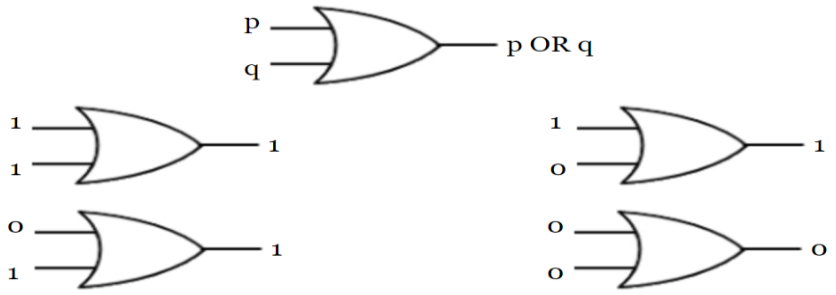
Puert a NOT



Puert a AND



Puert a OR



Puert a NAND

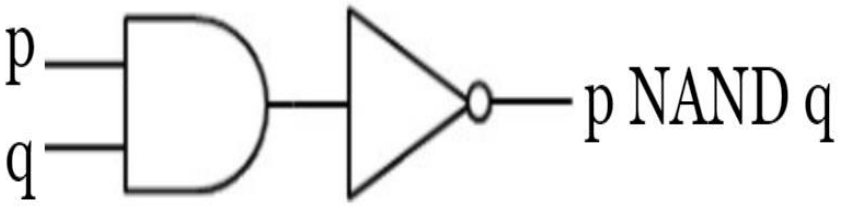


Figura 3.9 Puerta NOT. (González Cornejo, 2020)

Figura 3.10 Puerta AND. (González Cornejo, 2020)

Figura 3.11 Puerta OR. (González Cornejo, 2020)

Figura 3.12 Puerta NAND. (González Cornejo, 2020)

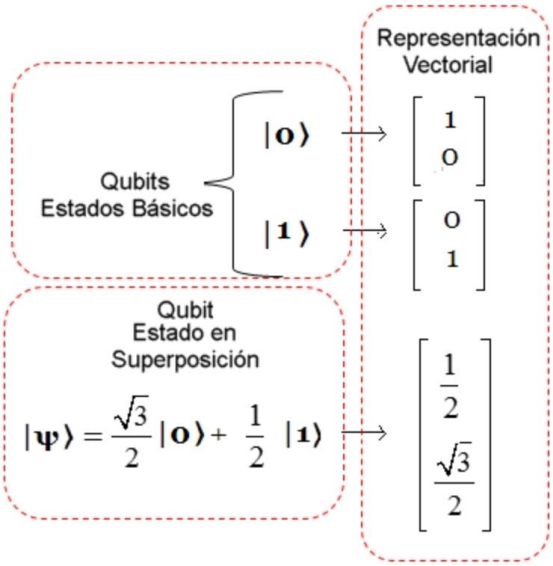


Figura 3.13 Representación vectorial de Qubit básicos y en superposición. (González Cornejo, 2020)

Podemos destacar seis diferentes puertas cuánticas:

- Puerta Toffoli:

Consiste en una puerta cuántica de tres bits de entrada y tres bits de salida.

Es conocida como la puerta NOT de doble control también llamada CCNOT. Si los dos primeros bits son 1, el ultimo bit se invierte.

Esta puerta no es universal para la computación cuántica.

Matriz de permutación

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 3.14 Matriz de permutación. (Frwiki, s.f)

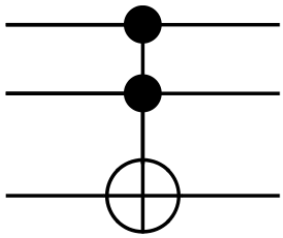


Figura 3.15 Puerta Toffoli. (Frwiki, s.f)

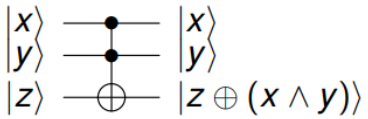


Figura 3.16 Entrada de 3 bits Toffoli. (Frwiki, s.f)

- Puerta CNOT:

Es una puerta de dos qubit o más. Es la puerta NOT controlada, la operación NOT se realiza en el segundo qubit si el primer qubit es |1>, si no fuese el caso se queda igual.

$$\mathrm{CNOT} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Figura 3.17 Matriz CNOT. (Wikipedia, s.f)

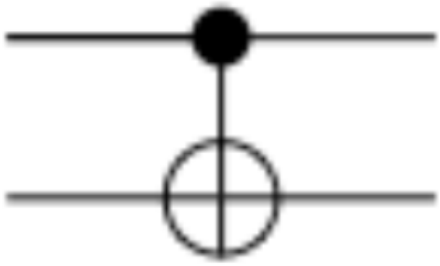


Figura 3.18 Puerta CNOT controlada en circuito. (Wikipedia, s.f)

- Puerta de Hadamard:

Es una puerta de un solo qubit. Se produce una superposición de los estados 0 y 1.

El estado base |0> pasa a $\frac{|0>+|1>}{\sqrt{2}}$ y |1> a $\frac{|0>-|1>}{\sqrt{2}}$. Equivale a una rotación de la esfera Bloch alrededor del eje x y z en radianes.

Figura 3.19 Puerta cuántica de Hadamard. (Wikipedia, s.f)

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Figura 3.20 Matriz de Hadamard. (Wikipedia, s.f)

- Puerta de Pauli-Z:

Es una puerta de un solo qubit. Equivale a una rotación de la esfera Bloch alrededor del eje z en radianes. (Wikipedia, s.f)

Su matriz es la siguiente:

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Figura 3.21 Matriz de Pauli-Z. (Wikipedia, s.f)

- Puerta de Pauli-Y:

Es una puerta de un solo qubit. Equivale a una rotación de la esfera Bloch alrededor del eje Y en radianes. (Wikipedia, s.f)

Su matriz es la siguiente:

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & -\mathrm{i} \\ \mathrm{i} & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 3.22 Matriz de Pauli-Y. (Wikipedia, s.f)

- Puerta Pauli-X:

Es una puerta de un solo qubit. La puerta lógica que equivale a esta es la puerta NOT. Equivale a una rotación de la esfera Bloch alrededor del eje X en radianes. (Wikipedia, s.f)

Su matriz es la siguiente:

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 3.23 Matriz de Pauli-X. (Wikipedia, s.f)

Figura 3.24 Diagrama cuántico CNOT. (Wikipedia, s.f)

3.5 Estándares y protocolos en la criptografía post-cuántica.

Hay diferentes tipos de estándares y protocolos cuánticos, pero se va a tratar solo cuatro que se han considerado de los más importantes:

La función que representa todo esto es la siguiente:

$C_i = M_I \oplus K_i$ para i = 1,2, …, n. Esto es para el cifrado.

$C_i \oplus K_i = M_i \oplus K_i \oplus K_i$. Esto es para el descifrado.

M_i son los n bits de cada carácter del texto, K_i la clave y C_i el mensaje cifrado.

- BB84: Consiste un protocolo de criptografía cuántica el cuál fue creado por Charles Bennett y Gilles Brassard en el año 1984. Su función primordial es el intercambio de claves a través de la comunicación cuántica.

Se procede a representar a dos tipos de personajes ficticios los cuáles son Alice y Bob para explicar el movimiento de datos.

Ambos se comunican por Internet y por un canal cuántico. Este protocolo facilita la detección de un espía o por un medio cuántico o por uno clásico, nunca en ambos.

El BB84 se divide en diversos pasos en los que se trata la información entre Alice y Bob:

- Paso 1: Alice debe generar N bits, para el bit 0 se otorga una base cuántica y para el bit 1 otra diferente.

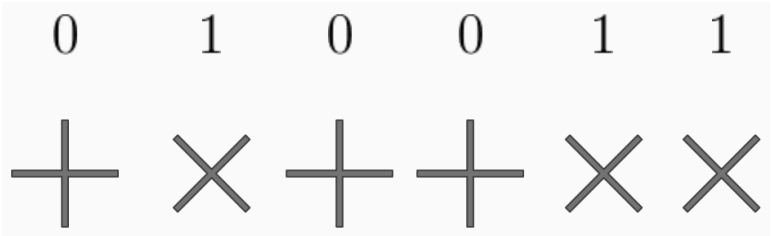


Figura 3.25 Otorgamiento de bases. (Owasp, s.f)

- Paso 2: Alice vuelve a generar N bits de forma aleatoria, en la posición de un 0 asigna un estado asociado con 0 y cuando es un 1 con un 1. Una vez asignados Alice se encarga de enviar estos estados a Bob.

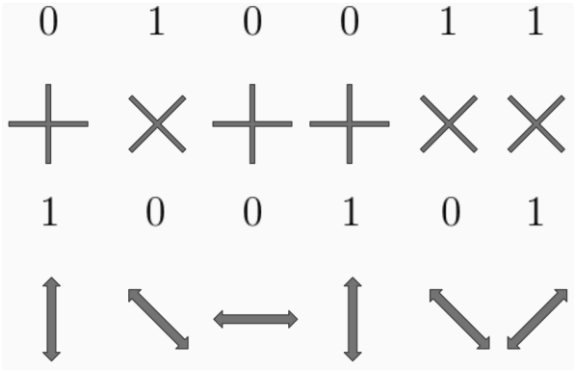


Figura 3.26 Asignar estados y envió. (Owasp, s.f)

- Paso 3: Bob genera N bits de forma aleatoria y los asocia a las bases cuánticas.

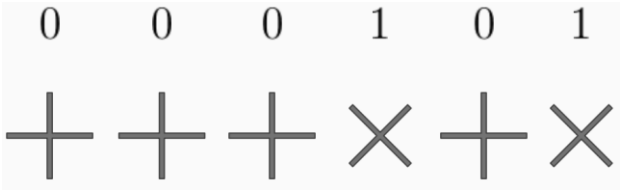


Figura 3.27 Asociar N bits a bases cuánticas. (Owasp, s.f)

- Paso 4: Bob se encarga de medir en qubit el mensaje que le envía Alice.

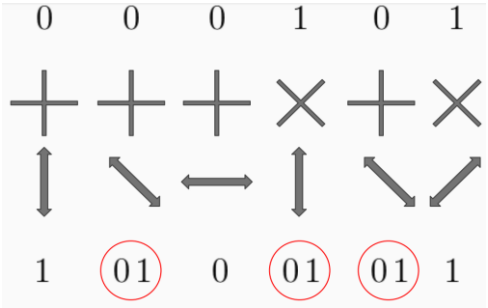


Figura 3.28 Medición del mensaje. (Owasp, s.f)

- Paso 5: Alice y Bob proceden a intercambiar las bases por Internet, las comparan, si son iguales se marcan como medidos, si no se marcan como inválidas.

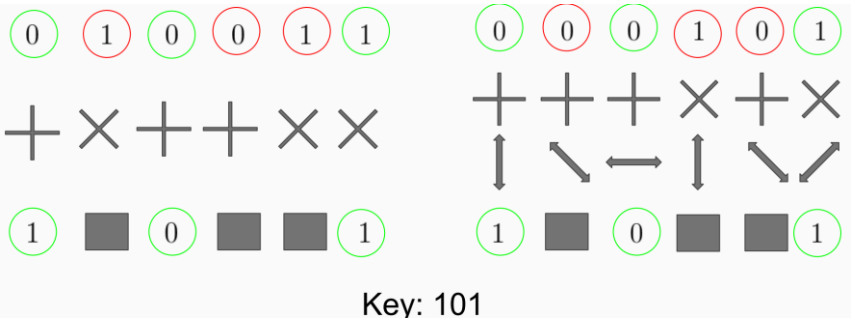


Figura 3.29 Intercambio de bases cuánticas. (Owasp, s.f)

(Owasp, s.f)

- E91: Consiste en un protocolo de criptografía cuántica creado por el físico polaco Artur Ekert en 1991. Se hizo famoso por ser uno de los primeros protocolos que utilizaba el entrelazamiento (correlación entre partículas cuánticas) o también llamado intrincación cuántica, también es el primer protocolo en usar pares entrelazados, esto consigue una transmisión de información entre Alice y Bob de forma más segura alrededor de un canal cuántico. Estos pares entrelazados son recibidos por los dos emisores y a la vez interpreta el estado que ha recibido por el canal mediante el uso de una base elegida aleatoriamente. Al acabar, los interlocutores intercambian por un canal público las bases, y se desechan los valores con bases distintas. El resultado correcto final consiste en una clave de ambos interlocutores la cual es idéntica o similar.

El E91 se divide en diversos pasos en los que se trata la información entre Alice y Bob:

- Paso 1: Alice genera una secuencia de bases aleatoria.

- Paso 2: Bob genera una secuencia de bases aleatoria.

- Paso 3: La fuente el cuál sistema que se encarga de generar pares de partículas entrelazadas envía pares entrelazados a ambos extremos.

- Paso 4: Alice interpreta los estados recibidos, según la secuencia creada por la misma.

- Paso 5: Bob interpreta los estados recibidos, según la secuencia creada por el mismo.

- Paso 6: Alice y Bob repiten los pasos 4 y 5 hasta que no se deje de emitir los pares ERP. Una vez que se dejan de emitir ambos interlocutores intercambian la secuencia de bases que se ha utilizado por medida.

- Paso 7: Alice o Bob ejerce una respuesta sobre el otro para manifestar la secuencia de valores indicando la base que se usó para hacer la medida.

(Martínez Mateo, 2008)

- SARG04: Consiste en un protocolo que surgió al usar el protocolo BB84 con otro método de descifrar la información. Utiliza pulsos de laser en vez de fotones. Todo esto hace que sea más robusto que el BB84.

Es más seguro contra ataques incoherentes de PNS

3.6 Máquina de Turing.

La máquina de Turing consiste en un modelo computacional el cual tiene funciones de escritura y lectura automáticamente sobre una cinta, la cual se genera una respuesta en esta misma cinta. En 1936, Alan Turing introdujo la máquina de Turing en el proyecto “On computable numbers, with an application to the

Entscheidungsproblem" en Londres. Este proyecto trataba el tema de si las matemáticas son decididles, lo cual es lo mismo que poder comprobar en todos los algoritmos su veracidad. Esta máquina verifico que hay problemas que una máquina no puede realizar o resolver. (EcuRed, s.f)

Figura 3.32 Máquina de Turing . (El País, s.f)

Está formada por:

- Alfabeto de entrada y respuesta.
- Un símbolo denominado blanco.
- Conjunto de transiciones entre estados y estados finitos.

El funcionamiento es simple, la máquina de Turing procede a leer una celda de la cinta por cada iteración, elimina el símbolo donde este ubicado el cabezal y añadiendo el nuevo símbolo de salida, después se mueve el cabezal a la izquierda o derecha. Este proceso se reitera hasta finalizar en el estado final. (EcuRed, s.f)

3.7 Máquina de Turing cuántica.

En 1985, Deutsch creó la máquina de Turing cuántica. Está formada por las mismas piezas que la máquina original lo único es que el elemento es un qubit.

El procesador de la máquina posee una guía con las indicaciones que se aplican al elemento de la cinta que marca el cabezal y realiza una instrucción por unidad de tiempo. (EcuRed, s.f)

3.8 Qubit.

Un qubit o también llamado bit cuántico es la unidad de información de la computación cuántica.

Al hablar de un qubit podemos relacionar el término de superposición, gracias a la superposición se logra una combinación lineal entre dos estados.

El bit ordinario solo se puede representar con un cero o uno, en cambio el qubit se puede representar por un cero, un uno o alguna proporción de cero y uno en la superposición de ambos, como se puede mostrar en la siguiente fotografía. (Azure Microsoft, s.f)

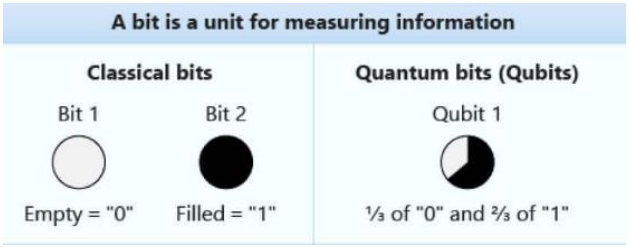


Figura 3.33 Diferencia entre qubit y bit . (Azure Microsoft, s.f)

3.9 Algoritmos vulnerables a ataques cuánticos.

Podemos destacar ciertos algoritmos vulnerables a ataques cuánticos. Basados en factorización destaca RSA, y en logaritmo discreto destacar ElGamal y curvas

elípticas.

De los algoritmos no vulnerables podemos destacar los de cifrado simétrico y la compartición de secretos como el algoritmo Shamir.

“Durante la Conferencia Enigma 2023 celebrada en Santa Clara (California) el pasado 24 de enero, el científico informático y experto en seguridad y privacidad, **Simson Garfinkel**, aseguró públicamente que la computación cuántica tenía pocas aplicaciones y recursos para **acabar con el cifrado RSA**. Además, añadía que si nos centramos en este asunto dejaremos la puerta abierta a otras amenazas inminentes.” (Delgado, 2023)

Sin embargo, el algoritmo RSA es vulnerable debido a que realiza operaciones de factorización de números grandes esto hace que los ordenadores cuánticos estén más preparados. Mediante el algoritmo Shor pueden hacerlo.

ElGamal es vulnerable debido al problema del logaritmo discreto, el cual también puede ser resuelto por un ordenador cuántico. Un ordenador cuántico con demasiada potencia podría romperlo.

Las curvas elípticas como el cifrado ECC también son vulnerables debido al problema del logaritmo discreto en curvas elípticas.

Los algoritmos de clave simétrica en teoría no son vulnerables a ataques cuánticos ya que no poseen problemas matemáticos como los asimétricos, un ejemplo de este es el algoritmo AES el cuál para aliviar un ataque se puede utilizar una clave más grande y esto complicara el ataque.

Capítulo 4

Concurso NIST

4.1 Descripción del concurso.

Es un concurso cuya finalidad consiste en ayudar a empresas, bancos, y distintas organizaciones a evitar riesgos de seguridad, mantener la información segura para que no caiga en malas manos en un futuro. En estos últimos años ha habido un aumento de investigación sobre la computación cuántica, el problema surge cuando se creen

ordenadores cuánticos a escala mundial, estos tendrían la capacidad de poder romper bastantes criptosistemas de clave pública. El objetivo primordial de la criptografía post-cuántica es que se puedan generar criptosistemas seguros para los ordenadores clásicos y los cuánticos. Algunos expertos indican que en 20 años se crearán ordenadores cuánticos de grandes tamaños que podrán romper todos los criptosistemas de clave pública. Hay 5 áreas esenciales en el marco de la ciberseguridad del concurso NIST:

- Identificación: Se debe identificar todos los elementos electrónicos, toda la parte de software que son usados por la empresa. Se debe elaborar una política de ciberseguridad la cual tiene que cumplir lo siguiente: Las funciones y responsabilidades de los integrantes y terceros de la empresa, una forma de actuar ante ataques para reducir riesgos.

- Protección: Utilización de programas seguros, mantener un control de quien accede a nuestros equipos y red, realizar copias de seguridad, eliminar datos irrelevantes, encriptar alguna información relevante.

- Detección: Examinar que usuarios no están autorizados a acceder a la red de la empresa, revisar la actividad maliciosa en la persona o en la red de la empresa.

- Respuesta: Revisar y mantener a raya un ataque, ir mejorando la política de ciberseguridad, poner en conocimiento de las autoridades competentes si ha habido alguna irregularidad, avisar a los clientes que han sido afectados por un ataque.

- Recuperación: Avisar a los empleados y clientes si se va a hacer un recuperado, revisar y restaurar los equipos afectados.

En el año 2020, el NIST anuncio los finalistas de la Ronda 3 mediante un proceso de estandarización post-cuántica. Se inicio el proceso con 69 algoritmos en la Ronda 1 en el año 2017, posteriormente en la Ronda 2 se redujo a 26 algoritmos y

finalmente en la Ronda 3 se redujo a 15 algoritmos. De estos 15 algoritmos se van a dividir en finalistas y suplentes, los suplentes serán estandarizados en la Ronda 4. (Comisión federal de comercio, s.f)

4.2 Descripción y análisis de los finalistas.

Los algoritmos de firma digital vamos a omitirlos ya que no son relevantes para este trabajo. En la siguiente tabla van a venir especificados los algoritmos de la Ronda 3 por tipo, y una breve descripción de ellos.

	Mecanismo de encapsulamiento de clave	
Tipo	Finalista	Alternativa
Basado en teoría de códigos	Classic McEliece	BIKE

correctores		HQC
Basado en retículos	CRYSTALS-KYBER NTRU SABER	FrodoKEM NTRU Prime
Basado en isogenias de curvas elípticas		SIKE

(PQSecure, 2020)

Para empezar, vamos a tratar el algoritmo ganador el cuál ha resultado ser el CRYSTAL-KYBER, posteriormente el McEliece, NTRU, SABER los cuáles han resultado finalistas, luego se procederá a describir brevemente las alternativas.

CRYSTALS-KYBER: Es un tipo de mecanismo de encapsulamiento de clave lo que se denomina también como KEM, la complejidad de este algoritmo se basa en resolver el aprendizaje con errores en las redes de módulos. Este algoritmo tiene tres niveles de seguridad. Kyber-512 cuya seguridad es similar a AES-128, Kyber-768 a AES-192 y Kyber-1024 a AES-256. Este esquema se basa en un esquema de cifrado seminal realizado por Regev. Lo bueno de este tipo de esquema están formados por la misma disposición que el ruido y además permite formar esquemas parecidos al LWE usando un cuadrado en vez de un rectángulo para una clave pública. Recientemente se añadió otro tipo que se creó e integro en la Ronda 2 del concurso NIST. (PQSecure,

2020)

McEliece: Es un criptosistema de clave pública, el cuál toma el nombre de su creador McEliece en el año 1978. La clave pública detalla un código Goppa binario aleatorio, la clave privada tiene la función de decodificar un código de forma eficiente. El proceso de la clave privada consta en tres pasos:

- Obtener la clave del texto cifrado.
- Identificar los errores.
- Corregir los errores.

El algoritmo McEliece fue diseñado de tal forma que se utilizó una de las propiedades de la clave pública la unidireccional, esto hace que no se pueda averiguar de forma eficaz la clave a través de la clave pública y el texto cifrado, esto se debe a que la clave se toma al azar.

Actualmente el algoritmo McEliece ha sabido mantenerse en el tiempo, además de ofrecer una buena seguridad. Se diseño para 2^{64} de seguridad, esto quiere decir que un ataque 2^{64} son las operaciones que necesita un intruso para poder deshacer el algoritmo mediante un ataque de fuerza bruta. Lo bueno es que es un sistema escalable esto va a provocar que haya seguridad para las nuevas de técnicas de la informática, como pueden ser los ordenadores cuánticos.

El algoritmo genera demasiado trabajo de seguimiento a la comunidad, esto genera mejoras. Gracias a este trabajo se ha producido mejoras en la eficiencia además en la seguridad, se podría hablar de mejoras sobre el PKE propuesto por Niederreiter, mejoras en la velocidad del software y hardware. Actualmente existe la capacidad de convertir un OW-CPA PKE es un KEM el cuál es IND-CCA2 lo que permite que sea

seguro ante ataque de ROM. El OW-CPA es un ataque de texto en claro de una sola dirección, es un esquema PKE el cuál es robusto ante ataques OW-CPA. IND-CCA2 indica que es resistente a ataques en las que el intruso o atacante tienen la capacidad de formular consultas de descifrado adaptativo. ROM es un modelo de la criptografía que tiene la función de revisar la seguridad del algoritmo. La conversión se rige mediante las siguientes normas:

- PKE es determinista.
- PKE no tiene fallos en texto cifrados correctos.

Para resumir el Classic McEliece consiste en un KEM que permite la seguridad IND-CCA2, además en ordenadores cuánticos. Este nivel de seguridad va aumentando para que en el tiempo se pueda proporcionar la seguridad necesaria ante ordenadores cuánticos. (PQSecure, 2020)

NTRU: Es un KEM que consta de dos algoritmos, el NTRUEncrypt que tiene la función de cifrar y descifrar y el NTRUSign se usa para clave pública. Aunque esta "suite" (término para referirnos a NTRUEncrypt y NTRUSign como un conjunto) fue patentada, hasta el año 2017 no fue mostrada de forma pública, se puede usar en aplicaciones con licencia GPL. Tiene la capacidad de realizar operaciones de clave privada de forma más rápida que el RSA y manteniendo la seguridad del RSA. Esto se debe a que el RSA realiza operaciones incrementando con el cubo de la clave, sin embargo, en NTRU es cuadrático. El NTRU es invulnerable a los ataques cuánticos por ahora, y el RSA es vulnerable. En el año 2009 Perlner y Cooper indico que el algoritmo NTRU podría ser la alternativa post-cuántica en cifrado y firma digital al algoritmo Shor. (PQSecure, 2020)

SABER: Es un KEM que permite la seguridad IND-CCA2, además en

ordenadores cuánticos, a través del problema del módulo con redondeo. Este algoritmo consta de tres niveles de seguridad:

- SABER: Parecido en términos de seguridad al AES-192.
- FireSABER: Parecido en términos de seguridad al AES-256.
- LightSABER: Parecido en términos de seguridad al AES-128.

El algoritmo tiene tres características claves:

- Se usa el aprendizaje con redondeo.
- Cada módulo son potencia de dos.
- Esta estructura que posee el módulo ofrece flexibilidad.

Ventajas del algoritmo SABER:

- Ideal para el anonimato en la comunicación, ejemplos como el navegador Tor.
- Es eficiente además de ser simple.

(PQSecure, 2020)

BIKE: Es un KEM basado en códigos correctores de errores, el cuál consiguió llegar a la ronda final del concurso NIST. Su seguridad es IND-CCA. El algoritmo BIKE ha ido evolucionando a lo largo del concurso NIST. En la primera ronda solo era seguro en ataques de texto plano. En la segunda ronda se realizaron tres nuevas variantes que ofrecían seguridad en ataques de cifrado. El proceso del algoritmo nos hace primero realizar una implementación de forma segura del protocolo de ataques de texto cifrado y mostramos que el rendimiento es ligeramente peor que una implementación segura del protocolo de ataques de texto plano. Una de las fases del algoritmo llamada desencapsulación, el algoritmo BIKE usa otro algoritmo para

decodificar que tiene un porcentaje de fallo llamado tasa de decodificación. El siguiente proceso consiste en analizar la tasa de decodificación de dos decodificadores diferentes de BIKE los cuáles son Back-Flip y Black-Gray, posteriormente utilizaremos un nuevo decodificador llamado Black-Gray-Flip el cual tiene la misma tasa de decodificación que los anteriores, pero es el doble de rápido. (PQSecure, 2020)

Finalmente se plantea un algoritmo para la inversión de polinomios binarios de la variante de BIKE llamada BIKE-2. Esta implementación nos indica que BIKE-2 es menor que sus variantes, esto la hace la favorita. (PQSecure, 2020)

HQC: Es un KEM basado en códigos correctores de errores, el cuál es considerado como una alternativa y no un algoritmo finalista. Su seguridad es IND-CPA, seguro frente ataques de texto plano. Es dirigido a los niveles 1, 3 y 5 del NIST. Mas eficiente que el algoritmo BIKE, además de poseer el texto cifrado y las claves públicas levemente superiores a BIKE. (PQSecure, 2020)

FrodoKEM: Es un KEM basado en retículos, el cuál es considerado como una alternativa y no un algoritmo finalista. Su seguridad es IND-CCA. Tiene una clave pública mayor pero menos restricciones de parámetros. Es dirigido a los niveles 1, 3 y 5 del NIST. (PQSecure, 2020)

NTRU Prime: Consiste en una modificación del NTRU de los años 90, para poder usar anillos sin las mismas estructuras requeridas. Su seguridad es IND-CCA2. (PQSecure, 2020)

SIKE: Es el único KEM del concurso NIST que está basado en isogenias de curvas elípticas. Utiliza operaciones de criptografía con curvas elípticas. Tiene la clave pública más pequeña que hay entre todos los candidatos y a su vez es la más lenta. (PQSecure, 2020)

4.3 Estudio comparativo.

En las siguientes tablas se va a mostrar un ejemplo del rendimiento de los diferentes tipos del algoritmo que hay por seguridad, va a estar medida por un procesador Intel-Core-i7 4770K, se va a tomar de referencias una implementación en C y otra en AVX2.

Kyber-512		
Tamaño(bytes)	Ciclos Haswell (C)	Ciclos Haswell (avx2)

Clave secreta:	1632	Generación de claves:	122684	Generación de claves:	33856
Paquete de datos:	800	Número de ciclos de CPU para cifrar datos:	154524	Número de ciclos de CPU para cifrar datos:	45200
Connecticut:	768	Número de ciclos de CPU para operación de diccionario:	187960	Número de ciclos de CPU para operación de diccionario:	34572

(Pq-Crystals, 2020)

Kyber-768					
Tamaño(bytes)		Ciclos Haswell (C)		Ciclos Haswell (avx2)	
Clave secreta:	2400	Generación de claves:	199408	Generación de claves:	52732
Paquete de datos:	1184	Número de ciclos de CPU para	235260	Número de ciclos de CPU para	67624

		cifrar datos:		cifrar datos:	
Connecticut:	1088	Número de ciclos de CPU para operación de diccionario:	274900	Número de ciclos de CPU para operación de diccionario:	53156

(Pq-Crystals, 2020)

Kyber-1024					
Tamaño(bytes)		Ciclos Haswell (C)		Ciclos Haswell (avx2)	
Clave secreta:	3168	Generación de claves:	307148	Generación de claves:	73544
Paquete de datos:	1568	Número de ciclos de CPU para	346648	Número de ciclos de CPU para	97324

	cifrar datos:		cifrar datos:
Connecticut: 1568	Número de ciclos de CPU para operación de diccionario:	396584	Número de ciclos de CPU para operación de diccionario:	79128

(Pq-Crystals, 2020)

Kyber-512-90s			
Ciclos Haswell (C)		Ciclos Haswell (avx2)	
Generación de claves:	213156	Generación de claves:	21880
Número de ciclos de CPU para cifrar datos:	213156	Número de ciclos de CPU para cifrar datos:	28592
Número de ciclos de CPU para operación de diccionario:	277612	Número de ciclos de CPU para operación de diccionario:	20980

(Pq-Crystals, 2020)

Kyber-768-90s	
Ciclos Haswell (C)	Ciclos Haswell (avx2)

Generación de claves:	389760	Generación de claves:	30460
Número de ciclos de CPU para cifrar datos:	432764	Número de ciclos de CPU para cifrar datos:	40140
Número de ciclos de CPU para operación de diccionario:	473984	Número de ciclos de CPU para operación de diccionario:	30108

(Pq-Crystals, 2020)

Kyber-1024-90s			
Ciclos Haswell (C)		Ciclos Haswell (avx2)	
Generación de claves:	636380	Generación de claves:	43212
Número de ciclos de CPU para cifrar datos:	672644	Número de ciclos de CPU para cifrar datos:	56556
Número de ciclos de CPU para operación de diccionario:	724144	Número de ciclos de CPU para operación de diccionario:	44328

(Pq-Crystals, 2020)

Hay diferencias entre cada una de estas versiones del algoritmo, se comparar las versiones implementadas de referencia y después las versiones optimizadas en avx2.

Se puede apreciar que las dos claves y el texto cifrado es mayor de una versión a otra,

como se muestra en la anterior figura. En las versiones avx2 el número de ciclos para cifrar, el número de ciclos para descifrar y la generación de claves es menor respecto al de referencia, lo cual tiene su lógica debido a que es una versión optimizada. En las versiones especiales Kyber-90 ocurren situaciones diferentes, si comparamos kyber-512 y kyber-512-90s la generación de claves, el número de ciclos para cifrar, el número de ciclos para descifrar en referencia es mayor en 90s, sin embargo, en avx2 es menor que la generada en Kyber-512, ocurre lo mismo en las otras versiones.

En la siguiente tabla se muestra los tamaños tanto del texto cifrado, la clave privada y la clave pública de las versiones del algoritmo McEliece

Tipo	Texto cifrado	Clave pública	Clave privada	Clave sesión
McEliece348864	96	261120	6492	32
McEliece460896	156	524160	13608	32
McEliece6688128	208	1044992	13932	32
McEliece6960119	194	1047319	13948	32
McEliece8192128	208	1357824	14120	32

(McEliece, 2022)

Se puede observar que en cuanto mayor es la versión del algoritmo mayor es el texto cifrado, clave pública y privada, exceptuando la versión McEliece6688128 que tiene una mayor clave pública y texto cifrado que McEliece6960119. Se puede observar que la clave de sesión la cuál va a ser temporal es de 32 bytes o lo que quiere decir 256 bits.

Mceliece	Cuartil	Mediana	Cuartil
mceliece348864 cifrado	34951	36457	38980
mceliece460896 cifrado	69674	76086	88956
mceliece6688128 cifrado	165296	171442	185077
mceliece6960119 cifrado	139980	144678	149592
mceliece8192128 cifrado	155174	156945	159040
mceliece348864 descifrado	127036	127140	127256
mceliece460896 descifrado	262919	263046	263225
mceliece6688128 descifrado	305910	306212	306925
mceliece6960119 descifrado	286353	286596	287038
mceliece8192128 descifrado	309938	310097	310475
mceliece348864 clave compartida	35039714	56705880	67615011
mceliece348864f clave compartida	35970884	35976620	35981416

mceliece460896 clave compartida	116209838	153266214	264539700
mceliece460896f clave compartida	117267744	117297677	117331130
mceliece6688128 clave compartida	265554240	443746986	532990499
mceliece6688128f clave compartida	274329761	274384229	274430338
mceliece6960119 clave compartida	241288202	316995472	468394597
mceliece6960119f clave compartida	240198020	240226771	240254131
mceliece8192128 clave compartida	308008713	486195290	664466919
mceliece8192128f clave compartida	306203040	306238935	306280509

(McEliece, 2022)

Se muestra que se ha dividido los ciclos en tres fases, la del primer cuartil la cuál muestra el valor más pequeño del 25 por ciento de menor valor de las mediciones. La mediana es el valor medio de todas las mediciones hechas. Este ayuda a reflejar el rendimiento típico. El tercer cuartil muestra el valor más pequeño del 25 por ciento de mayor valor de las mediciones

ntruhps2048509		
Tamaño(bytes)	Ciclos Haswell(ref)	Ciclos Haswell(avx2)
sk: 935	gen: 12506668	gen: Aún no medido
pk: 699	enc: 761236	enc: Aún no medido
ct: 699	dec: 1940870	dec: Aún no medido
ntruhps2048677		
Tamaño(bytes)	Ciclos Haswell(ref)	Ciclos Haswell(avx2)
sk: 1235	gen: 21833048	gen: Aún no medido
pk: 931	enc: 1313454	enc: Aún no medido
ct: 931	dec: 3399726	dec: Aún no medido
ntruhps4096821		
Tamaño(bytes)	Ciclos Haswell(ref)	Ciclos Haswell(avx2)
sk: 1592	gen: 31835958	gen: Aún no medido
pk: 1230	enc: 1856936	enc: Aún no medido
ct: 1230	dec: 4920436	dec: Aún no medido
ntruhrss701		
Tamaño(bytes)	Ciclos Haswell(ref)	Ciclos Haswell(avx2)
sk: 1452	gen: 23302424	gen: 381476
pk: 1138	enc: 1256210	enc: 71238
ct: 1138	dec: 3642966	dec: 77848

(Chen, y otros, 2019, p. 29)

Se muestra la información de las distintas versiones de ntru. En las diferentes versiones el valor en bytes de la clave secreta es mayor que el de la clave privada y el

texto cifrado, y cuanto mayor es la versión mayor es el tamaño de los parámetros citados. Respecto a los ciclos Haswell implementados en referencia en la generación de claves el que mayor tamaño tiene es el ntruhps4096821 seguido de ntruhrss701, ntruhps2048677 y ntruhps2048509 sucesivamente, en el proceso de cifrado el mayor tamaño es de ntruhps4096821 nuevamente seguido de ntruhps2048677, ntruhrss701 y ntruhps2048509, en el proceso de descifrar el mayor tamaño es de ntruhps4096821 nuevamente seguido de ntruhrss701, ntruhps2048677 y ntruhps2048509 como la generación de claves. En los ciclos Haswell de generación de claves, cifrado y descifrado de ntruhps2048509, ntruhps2048677, ntruhps4096821 aún está por definir, sin embargo, para ntruhrss701 sí que tenemos los tres parámetros, comparándolos con los de referencia de la misma versión son bastante inferiores.

Los datos reflejados nos indican que el algoritmo kyber, en especial kyber-90s en su versión optimizada es más rápido que los demás, en el tamaño de clave privada y pública la más grande es la de McEliece sobre todo la de mcEliece8192128. En términos de generación de clave el más rápido es el Kyber512-90s.

4.4 Futuro de la criptografía post-cuántica.

El futuro de la criptografía post-cuántica por ahora es incierto, aunque se tratara los riesgos, beneficios y consecuencias que puede acarrear este nuevo sector.

Riesgos:

- Mejoras o inclusión de nuevas técnicas que serían capaz de romper los algoritmos post- cuánticos, aunque estos en un futuro sean resistentes a ataques cuánticos. La evolución constante de la tecnología y por lo tanto de la criptografía.

- La falta de estudio actualmente puede hacer que en un futuro surjan nuevos inconvenientes que hagan retrasar el proceso de estandarización.

- Se necesitarán actualizaciones o mejoras en el algoritmo constantemente para asegurar la seguridad.

- Pasa de un modelo tradicional a uno cuántico no es tarea fácil, produciría un alto costo económico y logístico.

Beneficios:

- Seguridad ante ataques de algoritmos cuánticos por ordenadores cuánticos. Debido a que estaríamos preparados ante factorizaciones de números de gran tamaño.

- Mantener un control o preparación ante ataques cuánticos en un futuro hace que estemos más preparados.

- Evolucionar en los aparatos o sistemas que estaban acostumbrados al sistema clásico a ahora el sistema cuántico.

- Avance en las matemáticas, programación.

Consecuencias:

- Obligación de las sociedades, organizaciones o empresas a realizar avances en la computación cuántica para poder mantener sus intereses seguros.

- Realizar transformaciones en todos los aparatos, electrónica para que sea capaz de mantener los equipos seguros.

- Cooperación entre países para mantener la seguridad de ellos a salvo.

- Mantener un control sobre los avances en el sector.

Capítulo 5

Marco práctico

5.1 CRYSTAL-KYBER.

Se ha procedido a descargar el algoritmo ganador del concurso NIST. En un primero tema se intentó ejecutar en Windows, pero al dar complicaciones a la hora de compatibilidades con la instalación de alguna biblioteca requerida de OpenSSL.

El programa es el oficial facilitado por la página oficial del algoritmo. Consta de dos tipos de implementaciones, ref que es la que se va a usar y avx2 la cual está diseñada para CPU x86.

Como requisitos previos se exige la instalación de OpenSSL ya que hay funciones que se aprovechan de sus bibliotecas. Los pasos en la terminal constan de diversos pasos:

- Instalar dependencias: Debemos tener instalado en la terminal las siguientes dependencias: make y update.

Los comandos necesarios serían:

  - sudo apt-get update. Para instalar la dependencia update.
  - sudo apt-get install make. Para instalar la dependencia make.

- Clonar el repositorio de GitHub del algoritmo:
  - git clone https://github.com/pq-crystals/kyber.git
  - Descargar el archivo .gz y descomprimirlo en el directorio /usr/local/src.

- Instalación OpenSSL:

  - Actualizar los paquetes: sudo apt-get update.
  - Instalación del paquete libssl-dev: sudo apt-get install libssl-dev.
  - Dirigirse al escritorio /usr/local/src.
  - Descarga del archivo .gz desde la web: wget https://www.openssl.org/source/openssl-3.0.2o.tar.gz.
  - Extraer el archivo: tar -xf openssl-3.0.2v.tar.gz.
  -Dirigirse al directorio de openssl: cd openssl-3.0.2v.
  - Comprobar si se ha instalado viendo la versión: openssl versión -a.
  - Declarar las variables de entorno:
    - export CFLAGS=”-I/usr/local/opt/openssl.3.0.2/include”.
    - export NISTFLAGS=”-I/usr/local/opt/openssl.3.0.2/include”.
    - export LDFLAGS=”-I/usr/local/opt/openssl.3.0.2/lib”.
  - Configuración y compilación de OpenSSL:
    - ./config –prefix=/usr/local/ssl –openssldir=/usr/local/ssl shared zlib.
    - make install: Se instala OpenSSL en el directorio /usr/local/ssl.
  - Configuración de bibliotecas compartidas:
    - Acceder al archivo de configuración que se ha creado el cuál cuelga del directorio /usr/local/ssl/lib/etc.
    - Se accede al archivo cd /etc/ld.so.conf.d/.
    - Cargar datos del archivo a un archivo binario: vim opens-3.0.2v.conf.
    - Se nos abrirá un panel donde tenemos que colocar la ruta de la biblioteca OpenSSL: /usr/local/ssl/lib. Procedemos a guardar.

- Cargamos el enlace de configuración y veremos las bibliotecas cargadas:

Sudo ldconfig -v.

- Configuración archivos binarios:
  - Realizamos una copia de seguridad:
    - mv /usr/bin/c_rehash /usr/bin/c_rehash.BEKUP.
    - mv /usr/bin/openssl /usr/bin/openssl.BEKUP.
  - Edición del archivo enviroment que se encuentra en el directorio etc y a añadir el nuevo PATH que queremos tener.
    - vim /etc/enviroment.
    -PATH=”
/usr/local/sbin:/usr/local/bin:/usr/sbin:/usr/bin:/sbin:/bin:
/usr/games:/usr/local/games:/usr/local/ssl/bin”

- Compilar el directorio ref:
  - cd ref. Para dirigirnos al escritorio ref.
  - make. Una vez que nos encontramos en el directorio para compilar los programas.
  - make speed. Compila los programas benchmarking.
- Compilar el directorio avx2:
  - cd avx2. Para dirigirnos al escritorio ref.
  - make. Una vez que nos encontramos en el directorio para compilar los programas.
  - make speed. Compila los programas benchmarking.
  - Directorio del algoritmo Crystals-Kyber: Se accede mediante el comando ls

dentro del directorio kyber para mostrar su contenido. Podemos visualizar en la captura diferentes archivos y directorios.

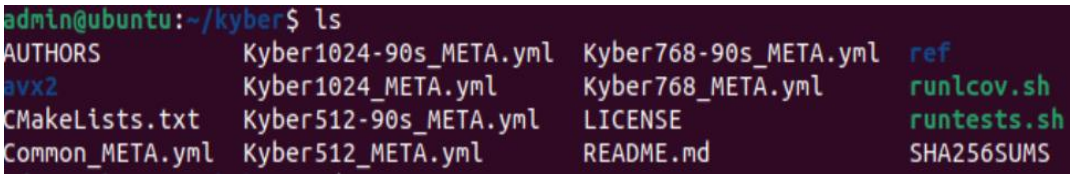


Figura 5.1 Directorio algoritmo del Kyber .

Podemos observar el siguiente contenido:

- Authors: Archivo que indica los autores del algoritmo.

- Avx2: Directorio donde están las instrucciones del algoritmo en la versión avx2 la cuál fue desarrollada por Intel para procesadores x86.

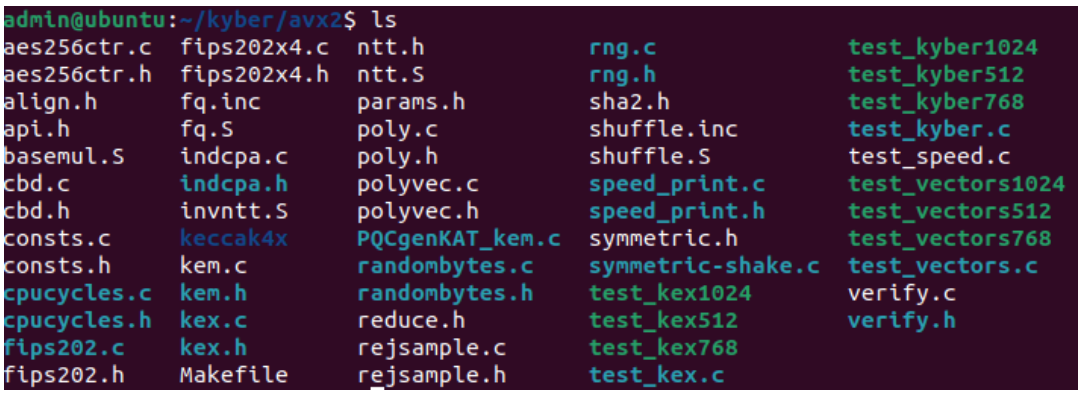


Figura 5.2 Figura del directorio avx2 del algoritmo Kyber.

- Aes256ctr.c: Archivo el cuál es una implementación del algoritmo AES-256 en modo contador o también llamado CTR, bajo una representación en avx2 optimizada para procesadores x86. Tiene funciones para encriptar, para generar PRF (secuencia de butes pseudoaleatorios), para inicializar un contexto de cifrado y para generar una secuencia de bloques cifrados en CTR.

- Aes256ctr.h: Encabezado del archivo aes256ctr.c.

- Align.h: Encabezado usado para alinear datos. Esto ayuda a la mejora del rendimiento.

- Basemul.S: Archivo en ensamblador para operaciones de multiplicación.

- Api.h: Define constantes para luego ser usadas en el algoritmo KYBER.

- Cbd.c: Archivo para generación de polinomios.

- Cbd.h: Encabezado del archivo Cbd.c.

- Consts.c: Archivo que define constantes usadas posteriormente en el algoritmo Kyber.

- Consts.h: Encabezado del archivo consts.h.

- Cpucycles.c: Llamada en comando de Linux al directorio ref que se encuentra colgando del padre de avx2 a un mismo nivel.

- Flips202.c: Llamada en comando de Linux al mismo archivo en el directorio ref.

- Flips202.h: Archivo de encabezado.

- Flips202x4.c: Archivo cuya función es la implementación de SHAKE128 y SHAKE 256 para procesar varios bloques de datos de manera simultánea.

- Flips202x4.h: Archivo de encabezado.

- Fq.inc: Archivo que tiene la función de usarse en multiplicaciones y otras operaciones en registros de 256 bits en avx2.

- Fq.S: Archivo en ensamblador para operaciones de campo finito.

- Indcpa.c: Archivo que se encarga de verificar la protección de la comunicación.

- Indcpa.h: Llamada en comando de Linux al mismo archivo en el directorio ref.

- Invntt.S: Archivo en ensamblador que implementa la transformación numérica inversa teórica.

- Kem.c: Archivo que contiene una implementación KEM del algoritmo Kyber.
- Kem.h: Llamada en comando de Linux al mismo archivo en el directorio ref.
- Kex.c: Llamada en comando de Linux al mismo archivo en el directorio ref.
- Kex.h: Archivo de encabezado.
- Makefile: Archivo de configuración para la compilación en Linux. Con escribir make en la terminal en el mismo directorio bastaría para compilar el programa.
- Ntt.h: Archivo de encabezado de la transformación numérica teórica.
- Ntt.S: Archivo en ensamblador dedicado a la transformación numérica teórica.
- Params.h: Archivo de encabezado para definir contantes del algoritmo kyber.
- Poly.c: Archivo cuya función es realizar operaciones polinómicas.
- Poly.h: Archivo de encabezado para operaciones polinómicas.
- Polyvec.c: Archivo cuya función es realizar operaciones polinómicas.
- Polyvec.h: Archivo de encabezado para operaciones polinómicas.
- PQCgenKAT_kem.c: Llamada en comando de Linux al mismo archivo en el directorio ref.
- Randombytes.c: Llamada en comando de Linux al mismo archivo en el directorio ref.
- Randombytes.h: Llamada en comando de Linux al mismo archivo en el directorio ref.
- Reduce.h: Archivo de encabezado el cual contiene operaciones para la transformación a Montgomery.
- Rejsample.c: Archivo en el que se define una matriz de dos dimensiones la cuál es llamada idx.
- Rejsample.h: Archivo de encabezado para el algoritmo kyber.

- Rng.c: Llamada en comando de Linux al mismo archivo en el directorio ref.

- Rng.h: Llamada en comando de Linux al mismo archivo en el directorio ref.

- Sha2.h: Archivo de encabezado para facilitar la simplificación del hash sha-256 y sha-512.

- Shuffle.inc: Archivo usado para cambiar de orden los elementos de matrices etc.

- Shuffle.S: Archivo en lenguaje ensamblador, su función es realizar operaciones shuffle en registros de 256 bits.

- Speed_print.c: Llamada en comando de Linux al mismo archivo en el directorio ref.

- Speed_print.h: Llamada en comando de Linux al mismo archivo en el directorio ref.

- Symmetric.h: Archivo de encabezado para versiones de kyber-90s.

- Symmetric-shake.c: Llamada en comando de Linux al mismo archivo en el directorio ref.

- Test_kex.c: Llamada en comando de Linux al mismo archivo en el directorio ref.

- Test_kex512: Test para ver si el sistema de intercambio de claves funciona en UAKE y AKE. Usa una longitud de clave de 512 bits.

- Test_kex768: Test para ver si el sistema de intercambio de claves funciona en UAKE y AKE. Usa una longitud de clave de 768 bits.

- Test_kex1024: Test para ver si el sistema de intercambio de claves funciona en UAKE y AKE. Usa una longitud de clave de 1024 bits.

- Test_kyber.c: Llamada en comando de Linux al mismo archivo en el directorio ref.

- Test_kyber512: Test para verificar la seguridad del algoritmo kyber en diferentes situaciones. Usa una longitud de clave de 512 bits.

- Test_kyber768: Test para verificar la seguridad del algoritmo kyber en diferentes situaciones. Usa una longitud de clave de 768 bits.

- Test_kyber1024: Test para verificar la seguridad del algoritmo kyber en diferentes situaciones. Usa una longitud de clave de 1024 bits.

- Test_speed.c: Archivo en el que se realizan diferentes pruebas 1000 veces con el fin de medir el rendimiento mediante el tiempo de ejecución en ciclos de CPU.

- Test_vectors.c: Llamada en comando de Linux al mismo archivo en el directorio ref.

- Test_vectors512: Archivo para comprobar si se crean las claves, y si hay un cifrado y descifrado de forma correcta. Usa una longitud de clave de 512 bits.

- Test_vectors768: Archivo para comprobar si se crean las claves, y si hay un cifrado y descifrado de forma correcta. Usa una longitud de clave de 768 bits.

- Test_vectors1024: Archivo para comprobar si se crean las claves, y si hay un cifrado y descifrado de forma correcta. Usa una longitud de clave de 1024 bits.

- Verify.c: Archivo cuya función principal es que no haya fugas de información en el paso del mensaje.

- Verify.h: Archivo de encabezado para aliviar las posibles fugas de información.

- Ref: Directorio donde están las instrucciones del algoritmo en la versión de referencia.

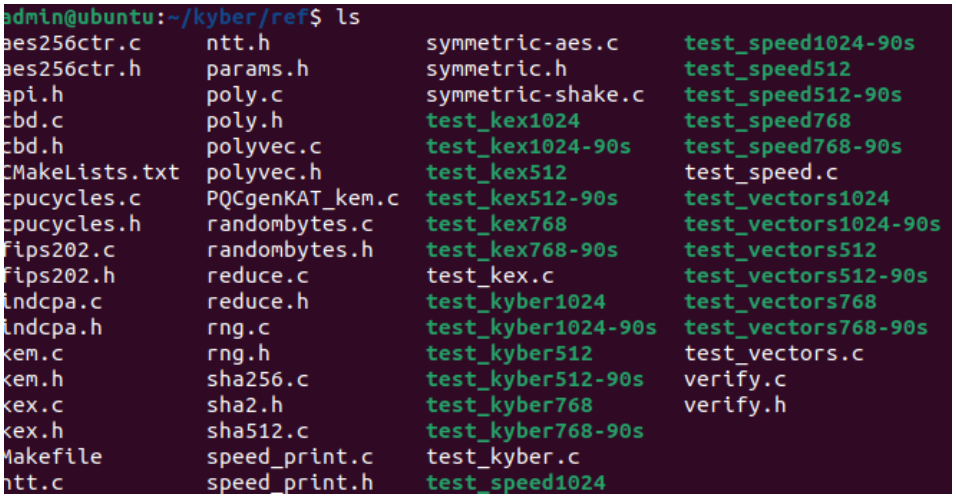


Figura 5.3 Figura del directorio ref del algoritmo Kyber.

Este directorio cuenta con los siguientes archivos:

- Aes256ctr.c: Consiste en una variante del algoritmo AES en CTR(Counter), permite trabajar en paralelo en bloques de 256 bits.

- Aes256ctr.h: Archivo de encabezado del algoritmo aes.

- Api.h: Archivo que consta de implementaciones del algoritmo Kyber en c.

- Cbd.c: Archivo que contiene implementaciones del algoritmo sobre generación de claves y cifrado.

- Cbd.h: Archivo de encabezado del módulo cbd.

- CMakeLists.txt: Archivo de texto donde se encuentra la configuración que queramos hacer para hacer diferentes pruebas en el algoritmo, diferentes versiones del algoritmo según la longitud de la clave etc.

- Cpucycles.c: Archivo que tiene la función de calcular la sobrecarga mínima, esto ayuda a obtener medidas más concretas.

- Cpucycles.h: Archivo de encabezado que ayuda a la hora de medir los ciclos de la CPU.

- Flips202.c: Archivo que se encarga de generar un hash SHA-3 de longitud de clave 256 bits mediante la función Keccak.

- Flips202.h: Archivo de encabezado que permite usa algoritmos como SHA-3 de 256 bits y de 512 bits, SHAKE128 y SHAKE256.

- Indcpa.c: Mismo significado que la función en el directorio avx2.

- Indcpa.h: Mismo significado que la función en el directorio avx2.

- Kem.c: Archivo que implementa un modelo de clave pública para proporcionar seguridad en el algoritmo Kyber.

- Kem.h: Archivo de encabezado utilizado para usar un modelo de clave pública.

- Kex.c: Archivo cuya función primordial es generar claves compartidas entre el emisor y el receptor.

- Kex.h: Archivo de encabezado que define las constantes y funciones usadas en el archivo Kex.c.

- Makefile: Mismo significado que la función en el directorio avx2.

- Ntt.c: Archivo en el que se realiza operaciones NTT en el algoritmo kyber.

- Ntt.h: Archivo de encabezado que define las constantes y funciones usadas en el archivo Ntt.c.

- Params.h: Mismo significado que la función en el directorio avx2.

- Poly.c: Mismo significado que la función en el directorio avx2.

- Poly.h: Mismo significado que la función en el directorio avx2.

- Polyvec.c: Mismo significado que la función en el directorio avx2.

- Polyvec.h: Mismo significado que la función en el directorio avx2.

- PQCgenKAT_kem.c: Archivo que tiene la función de testear el algoritmo kyber, utiliza diferentes casos para comprobar si funciona correctamente.

- Randombytes.c: Archivo cuya función es generar bytes aleatorios.

- Randombytes.h: Archivo de encabezado que define las constantes y funciones usadas en el archivo Randombytes.c.

- Reduce.c: Archivo de verificación para tratar sobre el resultado de operaciones modulares este en el rango correcto.

- Reduce.h: Archivo de encabezado que define las constantes y funciones usadas en el archivo Reduce.c.

- Rng.c: Archivo cuya función consiste en generar números aleatorios y números pseudoaleatorios que estén basado en AES-256 en modo CTR.

- Rng.h: Archivo de encabezado que define las constantes y funciones usadas en el archivo Rng.c.

- Sha256.c: Archivo que implementa SHA-256 del cuál se obtiene un hash de los parámetros de entrada.

- Sha2.h: Mismo significado que la función en el directorio avx2.

- Sha512.c: Archivo que implementa SHA-512 del cuál se obtiene un hash de los parámetros de entrada.

- Speed_print.c: Archivo en el que se obtienen parámetros estadísticos como la mediana, promedio, media etc.

- Speed_print.h: Archivo de encabezado que define las constantes y funciones usadas en el archivo Speed_print.c.

- Symmetric-aes.c: Archivo encargado de realizar operaciones de cifrado AES-

256 en CTR.

- Symmetric.h: Mismo significado que la función en el directorio avx2.

- Symmetric-shake.c: Archivo que permite el uso de SHAKE-128 y SHAKE-256.

- Test_kex.c: Archivo que trata de verificar si hay un intercambio UAKE y AKE correctamente.

-Test_kex512,test_kex512-90s,test_kex768,test_kex768-90s,test_kex1024, test_kex1024-90s: Mismo significado que la función en el directorio avx2.

- Test_kyber.c: Archivo para verificar la seguridad del algoritmo kyber en diferentes situaciones.

-Test_kyber512,test_kyber512-90s,test_kyber768,test_kyber768-90s,test_kyber1024, test_kyber1024-90s: Mismo significado que la función en el directorio avx2.

- Test_speed.c: Mismo significado que la función en el directorio avx2.

- Test_speed512:Test de velocidad con un nivel de seguridad similar a AES-128.

- Test_speed512-90s: Test de velocidad con un nivel de seguridad similar a AES-256 y SHA2 en vez de SHAKE.

- Test_speed768: Test de velocidad con un nivel de seguridad similar a AES-192.

- Test_speed768-90s: Test de velocidad con un nivel de seguridad similar a AES-256 y SHA2 en vez de SHAKE.

- Test_speed1024: Test de velocidad con un nivel de seguridad similar a AES-256.

- Test_speed1024-90s: Test de velocidad con un nivel de seguridad similar a AES-256 y SHA2 en vez de SHAKE.

- Test_vectors.c: Archivo que se encarga de comprobar si el sistema KEM funciona como tiene que ser y que la clave que ha sido compartida sea la misma por parte del emisor y receptor.

- Test_vectors512: Test de comprobación de uso correcto de kem con un nivel de seguridad similar a AES-128.

- Test_vectors512-90s: Test de comprobación de uso correcto de kem con un nivel de seguridad similar a AES-256.

- Test_vectors768: Test de comprobación de uso correcto de kem con un nivel de seguridad similar a AES-192.

- Test_vectors768-90s: Test de comprobación de uso correcto de kem con un nivel de seguridad similar a AES-256.

- Test_vectors1024: Test de comprobación de uso correcto de kem con un nivel de seguridad similar a AES-256.

- Test_vectors1024-90s: Test de comprobación de uso correcto de kem con un nivel de seguridad similar a AES-256.

- Verify.c: Mismo significado que la función en el directorio avx2.

- Verify.h: Mismo significado que la función en el directorio avx2.

- CMakeLists.txt: Archivo de configuración para generar scripts y archivos para algunos sistemas operativos distintos.

- Archivos yml: Son metadatos los cuáles sirven para la configuración y descripción de una instancia del algoritmo. Sirve como guía al programador o usuario que va a utilizar en el algoritmo donde aparecen diferentes campos como: el nombre

del algoritmo, el nivel de seguridad del NIST, el tipo de seguridad que requerimos(el usado es IND-CAA2), el tamaño de la clave pública, del texto cifrado, de la clave secreta y la clave secreta que ha sido compartido, tipo de algoritmo, un valor del hash sha256 usado para la integridad de los vectores que se generan en las pruebas de vectores y otro hash que se encarga de comprobar el resultado del algoritmo, información sobre los integrantes que han colaborado y participado en la creación del algoritmo, una sección llamada implementación generada en json en la cual da información del algoritmo.

Tenemos un ejemplo diferente a los otros tipos de archivos yml, el cuál es Common_META el cuál muestra las bibliotecas comunes del proyecto con una serie de especificaciones.

- Archivos sh: Runcov.sh consiste en un script cuya función es identificar la parte de código ejecutada en pruebas y generar el informe correspondiente. Runtests.sh tiene la función de realizar pruebas de forma automática.

- README: Archivo de texto que explica el funcionamiento y requisitos para trabajar con este algoritmo.

- SHA256SUMS: Consiste en un archivo donde se va a encontrar los valores de suma de verificación también llamado checksum en el inglés, se muestra los checksum correspondientes a los archivos tvecs512, tvecs512-90s, tvecs768, tvecs768-90s, tvecs1024, tvecs1024-90s. Esta información nos ayuda a comprobar si ha habido archivos que durante la transmisión o guardado han sido dañados o modificados.

5.2 NTRU.

- Directorio del algoritmo NTRU: Se accede mediante el comando ls dentro del directorio ntru para mostrar su contenido. Podemos visualizar en la captura diferentes

archivos y directorios.

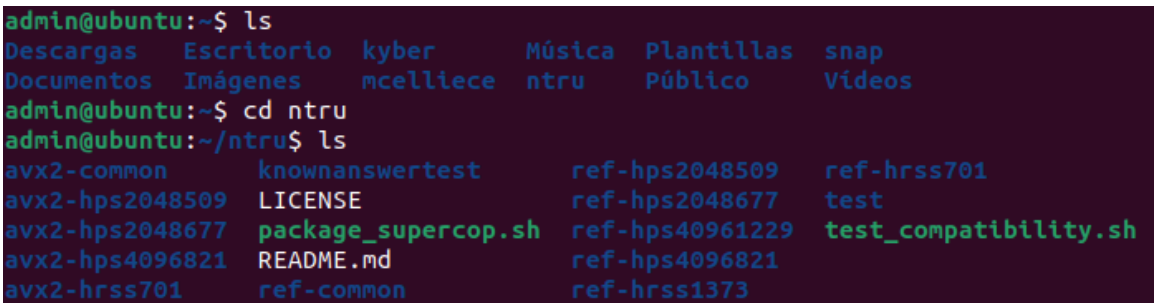


Figura 5.4 Figura del directorio del algoritmo NTRU.

Contiene los siguientes directorios, archivo script de shell, un archivo de licencia, archivos de guía como README:

- Avx2-common: Directorio el cual contiene cuatro archivos. Directorio del algoritmo ntru con la instrucción avx2 para procesadores Intel x86, en la cual se espera una mejora de la velocidad de carga. Este directorio contiene los siguientes archivos mostrados en la siguiente imagen.

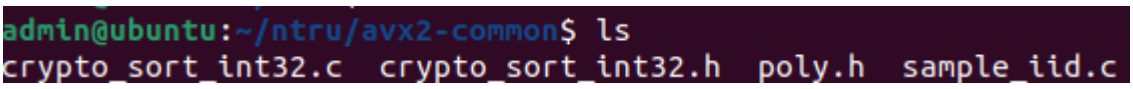


Figura 5.5 Figura del directorio avx2-common del algoritmo NTRU.

- Avx2-hps2048509: Versión optimizada del algoritmo ntru cuya implementación contiene unos parámetros que se asemejan a la seguridad ofrecida por el cifrado AES-128, esto indica que admite una clave de 128 bits. Este directorio contiene los siguientes archivos mostrados en la siguiente imagen.

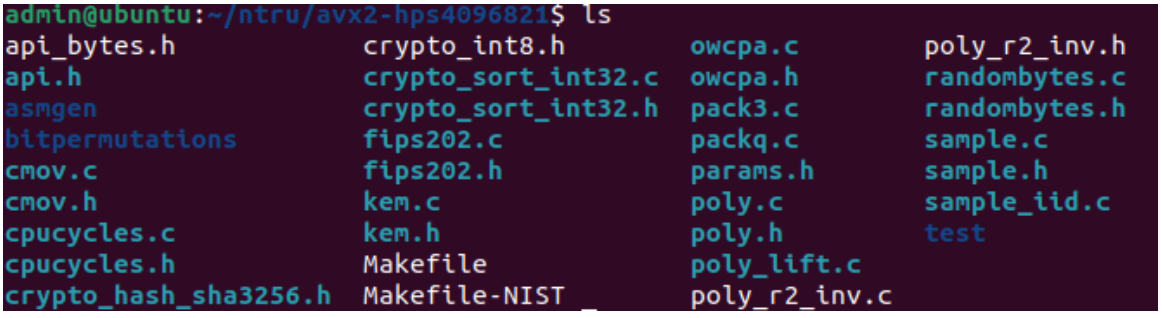


Figura 5.6 Figura del directorio avx2-hps4096821 del algoritmo NTRU.

- Avx2-hps2048677: Versión optimizada del algoritmo ntru cuya implementación contiene unos parámetros que se asemejan a la seguridad ofrecida por el cifrado AES-192, esto indica que admite una clave de 192 bits. Otorga más seguridad que el anterior. Este directorio contiene los siguientes archivos mostrados en la siguiente imagen.

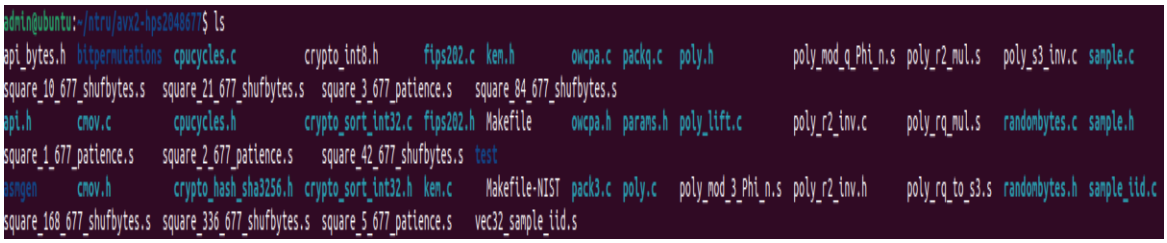


Figura 5.7 Figura del directorio avx2-hps2048677 del algoritmo NTRU.

- Avx2-hps4096821: Versión optimizada del algoritmo ntru cuya implementación contiene unos parámetros que se asemejan a la seguridad ofrecida por el cifrado AES-256, esto indica que admite una clave de 256 bits. Otorga más seguridad que los anteriores.

Este directorio contiene los siguientes archivos mostrados en la siguiente imagen.

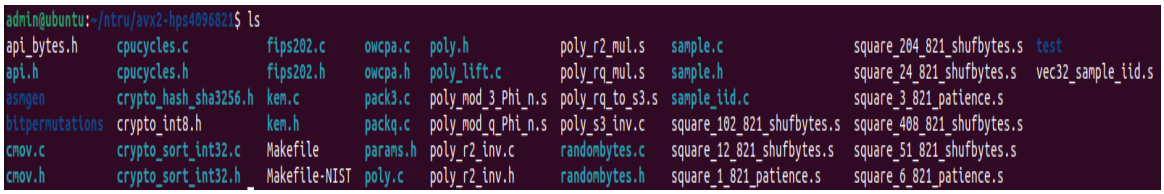


Figura 5.8 Figura del directorio avx2-hps4096821 del algoritmo NTRU.

- Avx2-hrss701: Versión optimizada del algoritmo ntru cuya matriz tiene una longitud de 701 unidades. Este directorio contiene los siguientes archivos mostrados en la siguiente imagen.

Figura 5.9 Figura del directorio avx2-hrss701 del algoritmo NTRU.

- Knownanswertest: Directorio para verificar la seguridad del algoritmo mediante una técnica llamada known answer test. Este directorio contiene los siguientes archivos mostrados en la siguiente imagen.

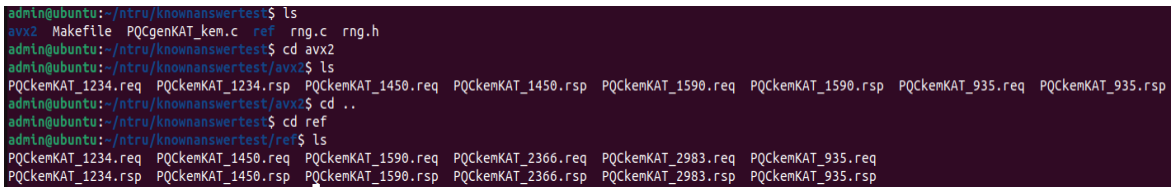


Figura 5.10 Figura del directorio Knownanswertest del algoritmo NTRU.

- License: Archivo en el que viene los términos y condiciones del algoritmo ntru.

- Package_supercop.sh: Archivo en script que realiza tareas de empaquetado de diferentes versiones de NTRU y obtiene metadatos.

- Readme.md: Archivo de guía para configuración e implementación del algoritmo.

- Ref-common: Directorio que contiene diferentes archivos comunes dentro de la implementación de referencia. Este directorio contiene los siguientes archivos mostrados en la siguiente imagen.

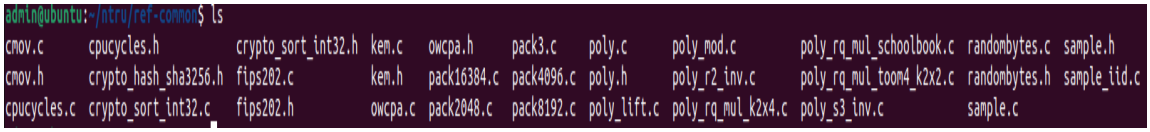


Figura 5.11 Figura del directorio ref-common del algoritmo NTRU.

- Ref-hps2048509: Versión de referencia del algoritmo ntru cuya implementación contiene unos parámetros que se asemejan a la seguridad ofrecida por el cifrado AES-128, esto indica que admite una clave de 128 bits. Este directorio

contiene los siguientes archivos mostrados en la siguiente imagen, comparten los mismos archivos con los tres siguientes directorios.

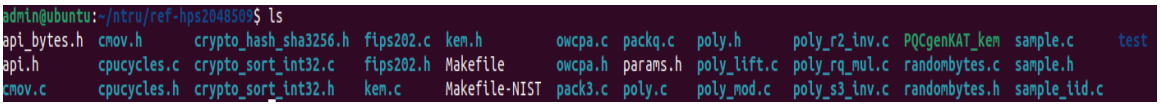


Figura 5.12 Figura del directorio ref-hps2048509 del algoritmo NTRU.

- Ref-hps2048677: Versión de referencia del algoritmo ntru cuya implementación contiene unos parámetros que se asemejan a la seguridad ofrecida por el cifrado AES-192, esto indica que admite una clave de 192 bits. Otorga más seguridad que el anterior.

-Ref-hps4096821: Versión de referencia del algoritmo ntru cuya implementación contiene unos parámetros que se asemejan a la seguridad ofrecida por el cifrado AES-256, esto indica que admite una clave de 256 bits. El espacio de clave es 2^{821}.

-Ref-hps40961229: Versión de referencia del algoritmo ntru cuya implementación contiene unos parámetros que se asemejan a la seguridad ofrecida por el cifrado AES-256, esto indica que admite una clave de 256 bits. El espacio de clave es 2^{1229}.

- Ref-hrss1373: Versión de referencia del algoritmo ntru, el tamaño tanto de la clave pública como privada es de 1373 bits. El nivel de seguridad está en torno a 128 bits.

Este directorio contiene los siguientes archivos mostrados en la siguiente imagen, comparten los mismos archivos con el siguiente directorio.

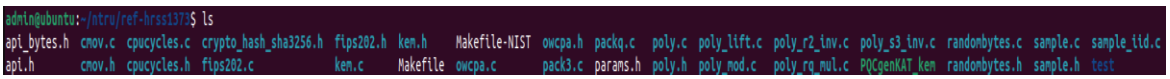


Figura 5.14 Figura del directorio ref-hrss1373 del algoritmo NTRU.

- Ref-hrss701: Versión de referencia del algoritmo ntru, el tamaño tanto de la clave pública como privada es de 701 bits. El nivel de seguridad está en torno a 128 bits.

- Test: Directorio en el cual se encuentran los diferentes testeos que se pueden realizar al compilar cada directorio del algoritmo.

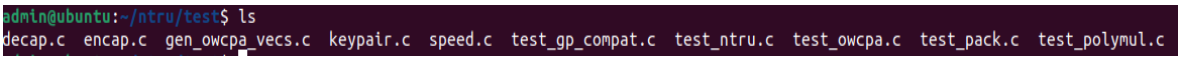


Figura 5.15 Figura del directorio test del algoritmo NTRU.

5.3 McEliece.

- Directorio del algoritmo McEliece: Se accede mediante el comando ls dentro del directorio ntru para mostrar su contenido. Podemos visualizar en la captura diferentes archivos y directorios.

Figura 5.16 Figura del directorio del algoritmo McEliece.

- Additional_Implementations: Directorio en el que se encuentra las implementaciones adicionales del algoritmo. El contenido del directorio se repite en los dos siguientes directorios, es el siguiente:

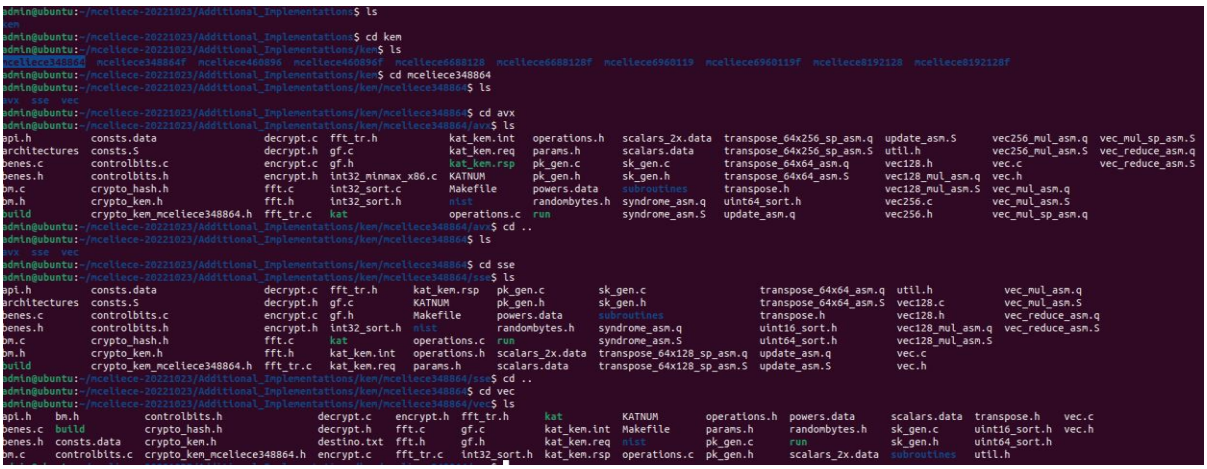


Figura 5.17 Figura del directorio Additional_Implementations del algoritmo McEliece.

Para poder compilar cualquiera de estos directorios tenemos que usar los siguientes comandos:

export CPATH="$CPATH:$HOME/include".

export LIBRARY_PATH="$LIBRARY_PATH:$HOME/lib".

export LD_LIBRARY_PATH="$LD_LIBRARY_PATH:$HOME/lib".

Se puede apreciar en la fotografía tres directorios dentro de cada configuración del algoritmo que indica las tres implementaciones adicionales.

- Optimized_Implementation: Directorio en el que se encuentra las implementaciones optimizadas avx2 del algoritmo.

- Reference_Implementation: Directorio en el que se encuentra las implementaciones de referencia del algoritmo.

- Supporting_Documention: Archivos de texto cuya función consiste en facilitar ayuda o soporte a los usuarios que deseen utilizar el algoritmo como prueba. El contenido del directorio es el siguiente:

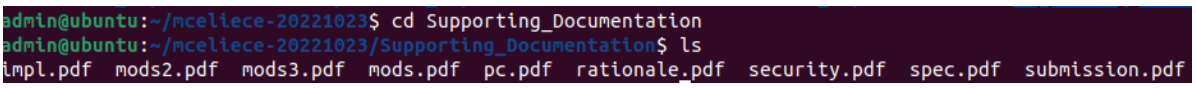


Figura 5.18 Figura del directorio Supporting_Documention del algoritmo McEliece.

-XCP: Librería necesaria a parte de Openssl instalación explicada en el punto 5.3. El contenido del directorio es el siguiente:

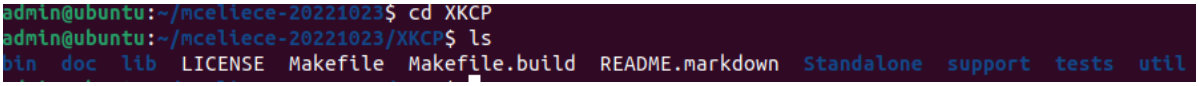


Figura 5.19 Figura del directorio XKCP del algoritmo McEliece.

5.4 Pruebas.

Se va a testear los diferentes archivos de prueba que hay en cada algoritmo. Para ello nos vamos a ayudar de la terminal de Linux, en la cuál con las configuraciones que se han realizado en pasos anteriores. El primero en ser testeado es el algoritmo kyber.

Kyber: Accedemos al perfil sudoers para no tener ningún problema de permisos, introducimos nuestra contraseña, al estar ya en el usuario admin, se procede a desplazarse al directorio de inicio donde se tiene descomprimido e instalado el algoritmo kyber.

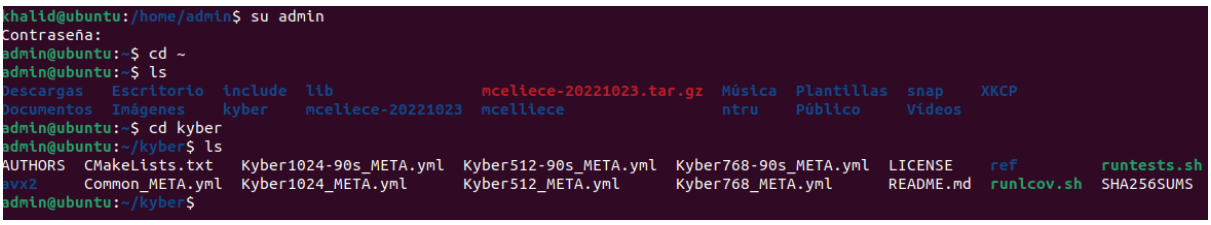


Figura 5.20 Acceso a kyber.

El siguiente paso es elegir si queremos testear la implementación en referencia o avx2.

Accedemos al directorio referencia.

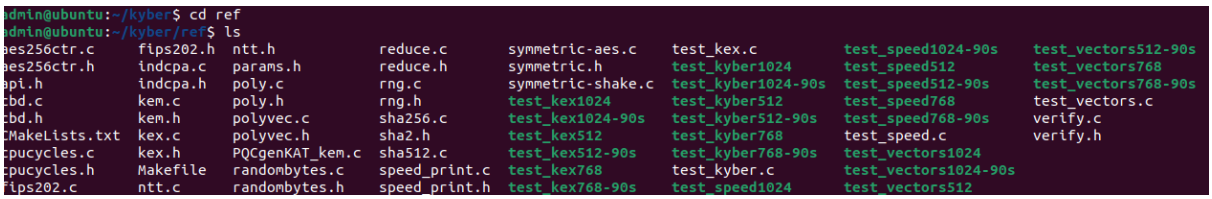


Figura 5.21 Acceso a kyber/ref.

La información de todos los textos está en un archivo comprimido en la subida de la memoria por eso se pondrá de ejemplo una prueba de cada tipo.

Para ello se va a seleccionar kyber 512 y posteriormente su salida por pantalla.

- Test_Kex512: Se verifica si hay intercambio de claves con UAKE y AKE, la longitud de la clave es 512 bits. La salida es la siguiente:

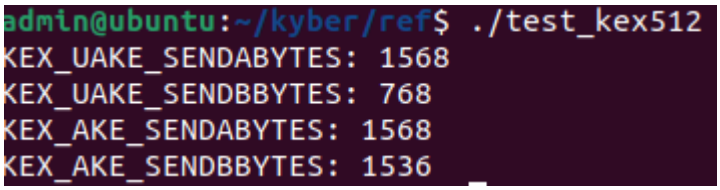


Figura 5.22 Ejemplo de salida de datos de Test Kex 512.

KEX_UAKE_SENDABYTES: El tamaño de los datos de UAKE enviados de Alice a Bob en el proceso de intercambio a.

KEX_UAKE_SENDABYTES: El tamaño de los datos enviados de UAKE enviados de Bob a Alice en el proceso de intercambio b.

KEX_UAKE_SENDABYTES: El tamaño de los datos de AKE enviados de Alice a Bob en el proceso de intercambio a.

KEX_UAKE_SENDABYTES: El tamaño de los datos enviados de AKE enviados de Bob a Alice en el proceso de intercambio b.

Se observa solo diferencia en el tamaño de datos de UAKE en el intercambio b y el tamaño de datos de UAKE en el intercambio b, el tamaño de datos de UAKE en el

intercambio a es igual al tamaño de datos de AKE en el intercambio a.

- Test_Kyber512: Se verifica si la seguridad del algoritmo kyber cuya longitud de clave es 512 bits.

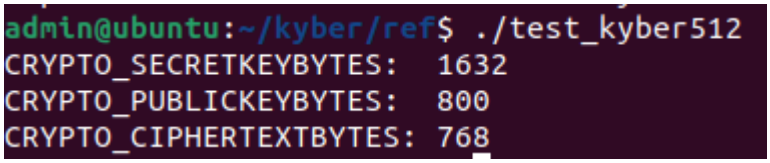


Figura 5.23 Ejemplo de salida de datos de Test Kyber 512.

CRYPTO_SECRETKEYBYTES: Valor de la clave secreta en bytes.

CRYPTO_SECRETKEYBYTES: Valor de la clave secreta en bytes

CRYPTO_SECRETKEYBYTES: Valor de la clave secreta en bytes

Gracias a estas variables se pueden obtener el tamaño de diferentes parámetros como claves etc.

- Test_Speed512: En esta función se mide la mediana y el promedio del ciclo en CPU de diferentes funciones. Esto mide la velocidad que tarda en procesarse cada función.

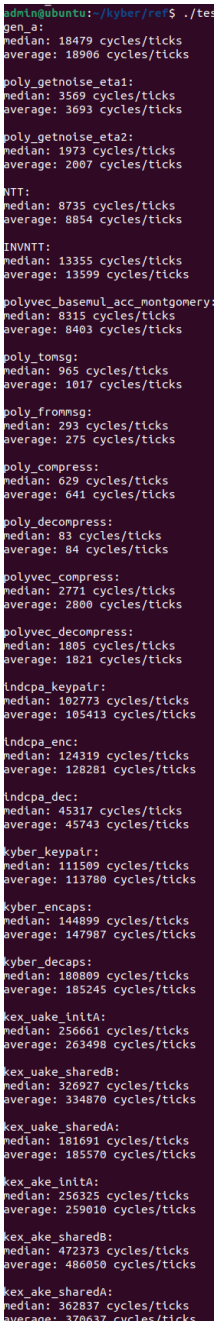


Figura 5.24 Ejemplo de salida de datos de Test Speed 512.

Test_Vectors512: Prueba para ver cómo se generan las claves, encapsulamiento y des encapsulamiento en hexadecimal. Y como último la clave que comparte Alice y Bob. _No se puede mostrar todo el proceso porque se excede en caracteres, pero se puede mostrar las claves compartidas de Alice y Bob, el texto cifrado y la clave secreta y pública.

Figura 5.25 Ejemplo de salida de datos de Test Vectors 512.

Accedemos al directorio avx2.

Figura 5.26 Acceso a directorio avx2.

Las funciones que nos interesan son las siguientes:

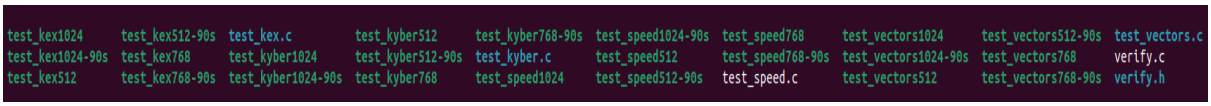


Figura 5.27 Funciones importantes del directorio avx2.

La información de todos los textos está en un archivo comprimido en la subida de la memoria por eso se pondrá de ejemplo una prueba de cada tipo.

Para ello se va a seleccionar kyber 512 y posteriormente su salida por pantalla.

- Test_Kex512: Misma función que en la versión de referencia.

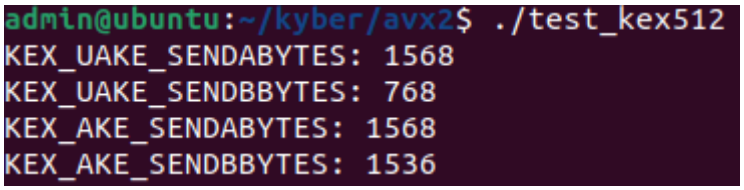


Figura 5.28 Ejemplo de salida de datos de Test Kex 512 en avx2.

- Test_Kyber512: Misma función que en la versión de referencia.

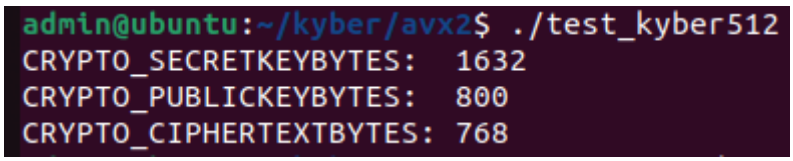


Figura 5.29 Ejemplo de salida de datos de Test Kyber 512 en avx2.

- Test_Vectors512: Misma función que en la versión de referencia.

Figura 5.30 Ejemplo de salida de datos de Test Vectors 512 en avx2.

- Test_Speed512: Misma función que en la versión de referencia.

```
admin@ubuntu:~/kyber/avx2$ ./test_speed512
gen_a:
median: 8231 cycles/ticks
average: 10141 cycles/ticks

poly_getnoise_eta1:
median: 2435 cycles/ticks
average: 2513 cycles/ticks

poly_getnoise_eta2:
median: 1595 cycles/ticks
average: 1590 cycles/ticks

poly_getnoise_eta1_4x:
median: 4787 cycles/ticks
average: 4860 cycles/ticks

NTT:
median: 209 cycles/ticks
average: 193 cycles/ticks

INVNTT:
median: 209 cycles/ticks
average: 204 cycles/ticks

polyvec_basemul_acc_montgomery:
median: 167 cycles/ticks
average: 195 cycles/ticks

poly_tomsg:
median: 41 cycles/ticks
average: 38 cycles/ticks

poly_frommsg:
median: 41 cycles/ticks
average: 38 cycles/ticks

poly_compress:
median: 41 cycles/ticks
average: 36 cycles/ticks

poly_decompress:
median: 41 cycles/ticks
average: 40 cycles/ticks

polyvec_compress:
median: 209 cycles/ticks
average: 198 cycles/ticks

polyvec_decompress:
median: 83 cycles/ticks
average: 99 cycles/ticks

indcpa_keypair:
median: 16169 cycles/ticks
average: 16497 cycles/ticks

indcpa_enc:
median: 16589 cycles/ticks
average: 17361 cycles/ticks

indcpa_dec:
median: 1007 cycles/ticks
average: 1000 cycles/ticks

kyber_keypair:
median: 23099 cycles/ticks
average: 24734 cycles/ticks

kyber_encaps:
median: 34019 cycles/ticks
average: 35037 cycles/ticks

kyber_decaps:
median: 38555 cycles/ticks
average: 40342 cycles/ticks

kex_uake_initA:
median: 79925 cycles/ticks
average: 74384 cycles/ticks

kex_uake_sharedB:
median: 62831 cycles/ticks
average: 77647 cycles/ticks

kex_uake_sharedA:
median: 39941 cycles/ticks
average: 37776 cycles/ticks

kex_ake_initA:
median: 56951 cycles/ticks
average: 62468 cycles/ticks

kex_ake_sharedB:
median: 96935 cycles/ticks
average: 114570 cycles/ticks

kex_ake_sharedA:
median: 80765 cycles/ticks
average: 85737 cycles/ticks
```

Figura 5.31 Ejemplo de salida de datos de Test Speed 512 en avx2.

Ntru: Accedemos al perfil sudoers para no tener ningún problema de permisos, introducimos nuestra contraseña, al estar ya en el usuario admin, se procede a desplazarse al directorio de inicio donde se tiene descomprimido e instalado el algoritmo ntru.

Figura 5.32 Acceso al directorio ntru.

Respecto a kyber, en ntru no hay directorio referencia ni avx2, si no que se divide en directorios de cada versión algoritmo con implementación ya sea red y avx2. Avx2-common y Ref-common son las funciones comunes de los algoritmos. Voy a tomar de ejemplo uno de avx2 y otro de referencia.

De referencia voy a seleccionar ref-hps2048509 y de avx2 avx2-hps2048509 para comparar la misma versión de algoritmo con diferente implementación.

Accedemos al directorio ref-hps2048509, y a su vez dentro del directorio test:

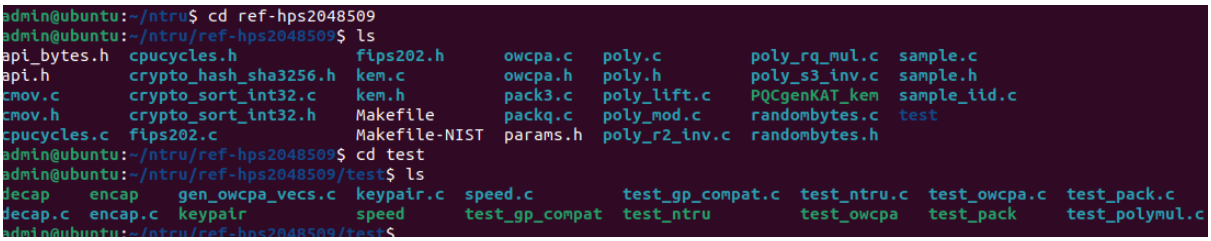


Figura 5.33 Contenido de ref-hps2048509/test.

Se va a realizar el test_gp_compat, test_ntru, test_pack y test_owcpa:

- Test_gp_compat: Prueba que verifica si las operaciones de polinomios en ntru son compatibles con PARI/GP.

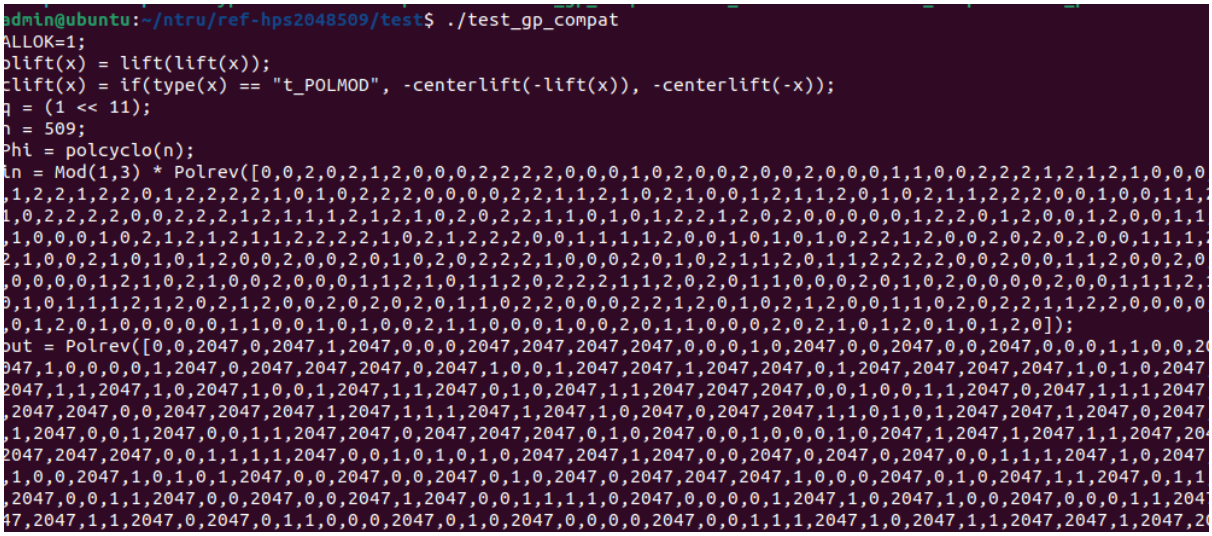


Figura 5.34 Ejemplo de salida de datos de Test Gp Compat.

Al estar ALLOK a 1 quiere decir que ha funcionado perfectamente el test.

- Test_ntru: Prueba que verifica si al generar claves, cifrado y descifrado se ofrece estabilidad y precisión. El resultado es success por lo tanto ha sido un éxito.

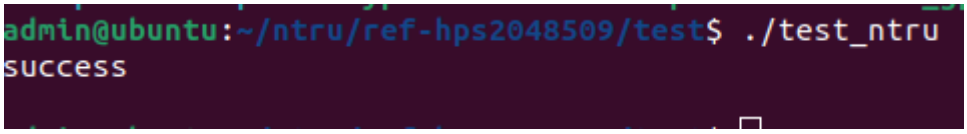


Figura 5.35 Ejemplo de salida de datos de Test ntru.

- Test_pack: Prueba que verifica si en la función de codificación y decodificación se ofrece estabilidad y precisión. El resultado es success por lo tanto ha sido un éxito.

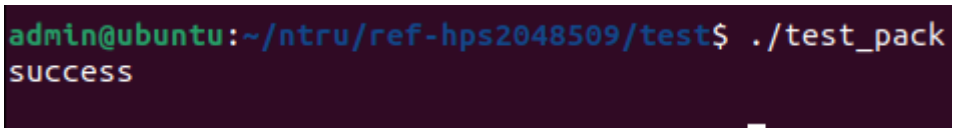


Figura 5.36 Ejemplo de salida de datos de Test pack.

- Test_owcpa: Prueba que verifica si OWCPA es seguro contra diversos ataques y ofrece estabilidad y precisión. El resultado es success por lo tanto ha sido un éxito.

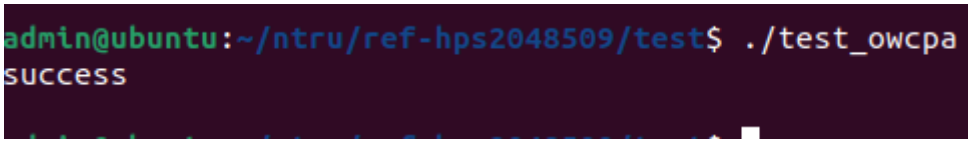


Figura 5.37 Ejemplo de salida de datos de Test owcpa.

Accedemos al directorio avx2-hps2048509:

Se va a realizar el test_gp_compat, test_ntru, test_pack y test_owcpa:

- Test_gp_compat: Misma función que la implementación de referencia.

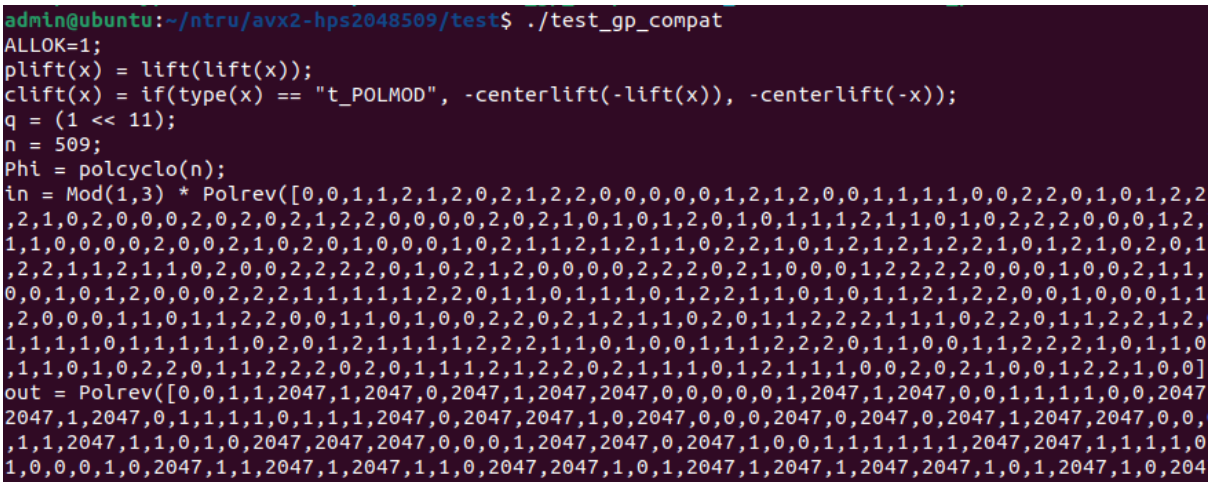


Figura 5.38 Ejemplo de salida de datos de Test Gp Compat.

Al estar ALLOK a 1 quiere decir que ha funcionado perfectamente la prueba.

- Test_ntru: Misma función que la implementación de referencia.

Figura 5.39 Ejemplo de salida de datos de Test ntru.

El resultado es success por lo tanto ha sido un éxito.

- Test_pack: Misma función que la implementación de referencia.

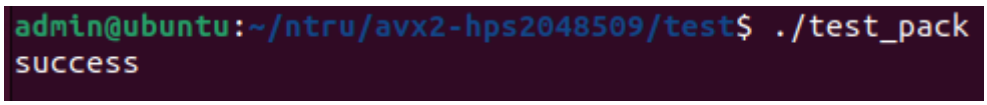


Figura 5.40 Ejemplo de salida de datos de Test pack.

El resultado es success por lo tanto ha sido un éxito.

- Test_owcpa: Misma función que la implementación de referencia.

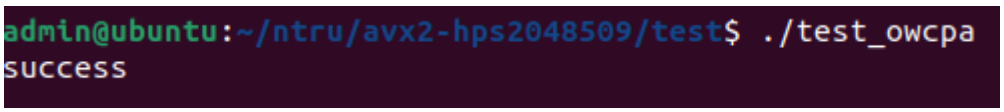


Figura 5.41 Ejemplo de salida de datos de Test owcpa.

El resultado es success por lo tanto ha sido un éxito.

McEliece: Accedemos al perfil sudoers para no tener ningún problema de permisos, introducimos nuestra contraseña, al estar ya en el usuario admin, se procede a desplazarse al directorio de inicio donde se tiene descomprimido e instalado el algoritmo McEliece.

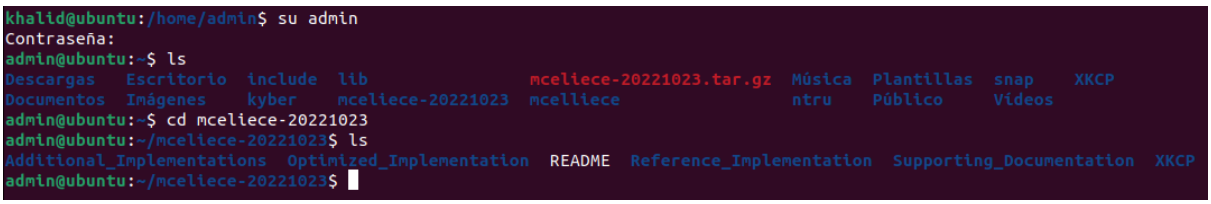


Figura 5.42 Acceso al directorio mceliece.

Se procederá a explicar una versión de cada directorio que hay. Una de referencia, una optimizada y una adicional. Para empezar, se accederá al directorio Reference_Implementation.

- Reference_Implementation: Acceder directorio de referencia y después al directorio intermedio llamado kem cuyo contenido es el siguiente:

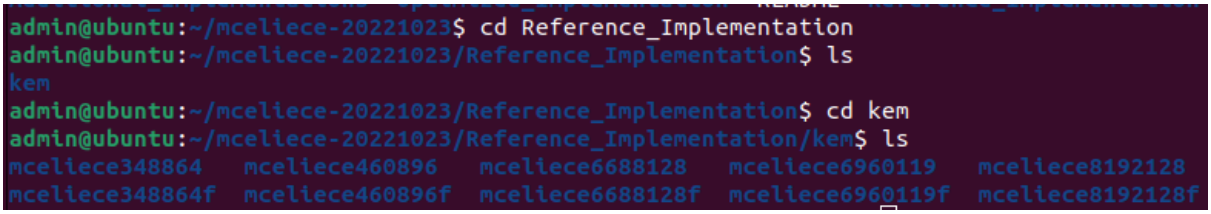


Figura 5.43 Acceso al directorio mceliece/Reference_Implementation.

Escogemos mceliece348864: Compilamos y arreglamos el error surgido de biblioteca exportando las etiquetas a una dirección para que reconozca el encabezado.

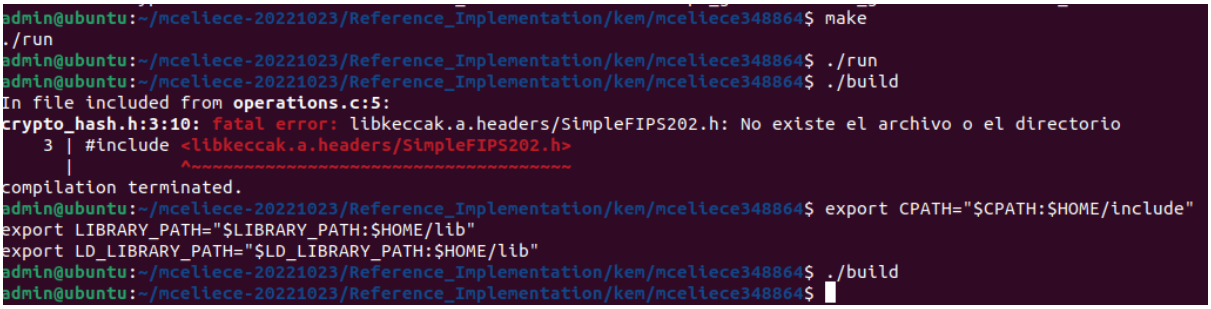


Figura 5.44 Arreglo de encabezado libckeccak no encontrado.

Mostramos el contenido del directorio:

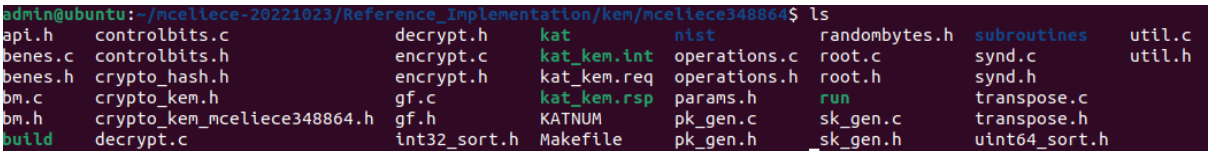


Figura 5.45 Contenido de directorio mceliece/Reference_Implementation/kem/mceliece348864.

Tenemos que abrir los archivos generados kat_kem.int, kat_kem.req y kat_kem.int:

- Kat_kem.int: Archivo que contiene parámetros ya definidos para ser usados en diferentes pruebas.

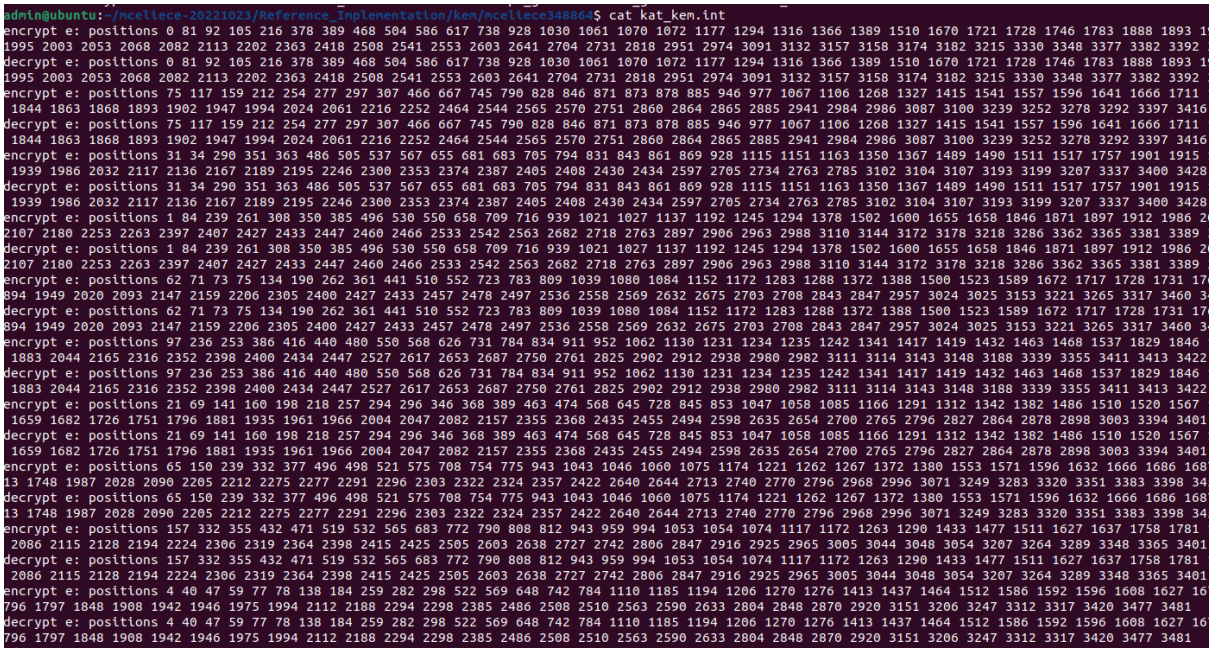


Figura 5.46 Resultado de kat_kem.int.

- Kat_kem.req: Archivo que utiliza los parámetros generados por kat_kem.int para después realizar peticiones al algoritmo.

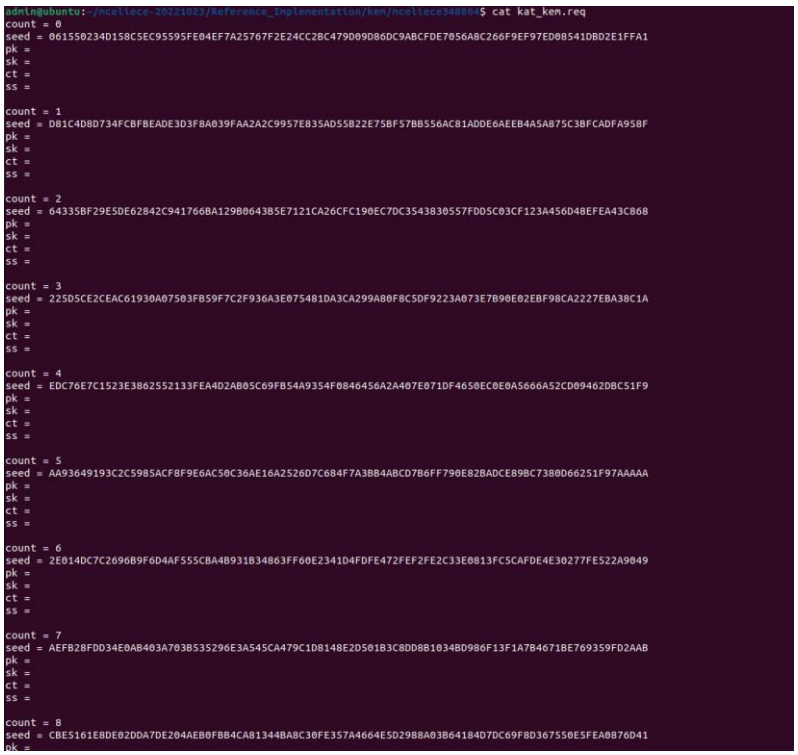


Figura 5.47 Resultado de kat_kem.req.

- Kat_kem.rsp: Archivo que utiliza las peticiones de Kat_kem.req para generar una serie de respuestas correctas.

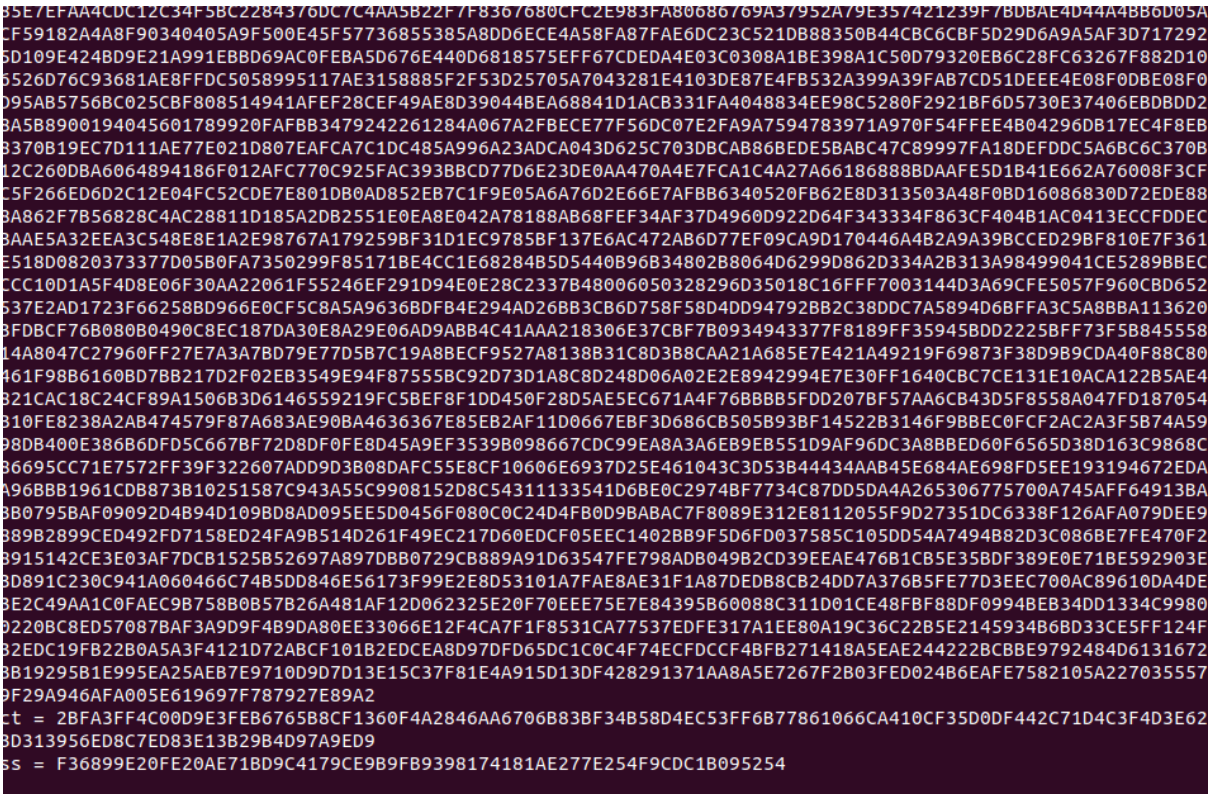


Figura 5.48 Resultado de Kat_kem.rsp.

Muestra todos los parámetros de kat_kem.req, todos los datos almacenados están guardados en el archivo comprimido de la entrega.

Posteriormente se accede al directorio Optimized_Implementation.

- Optimized_Implementation: Acceder directorio optimizado y después al directorio intermedio llamado kem cuyo contenido es el siguiente:

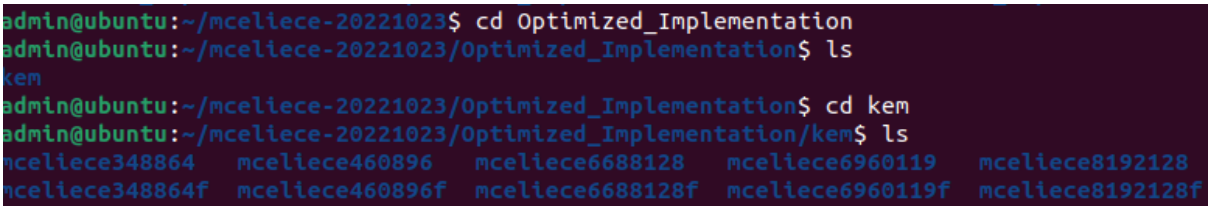


Figura 5.49 Accedemos a Optimized_Implementation.

Escogemos mceliece348864 como en el directorio de referencia.

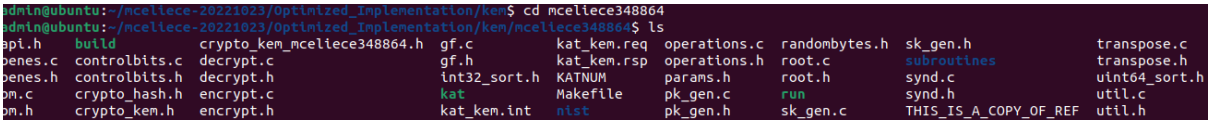


Figura 5.50 Mostramos contenido del directorio mceliece348864.

Tenemos que abrir los archivos generados kat_kem.int, kat_kem.req y kat_kem.int:

- Kat_kem.int: Misma función que la implementación de referencia.

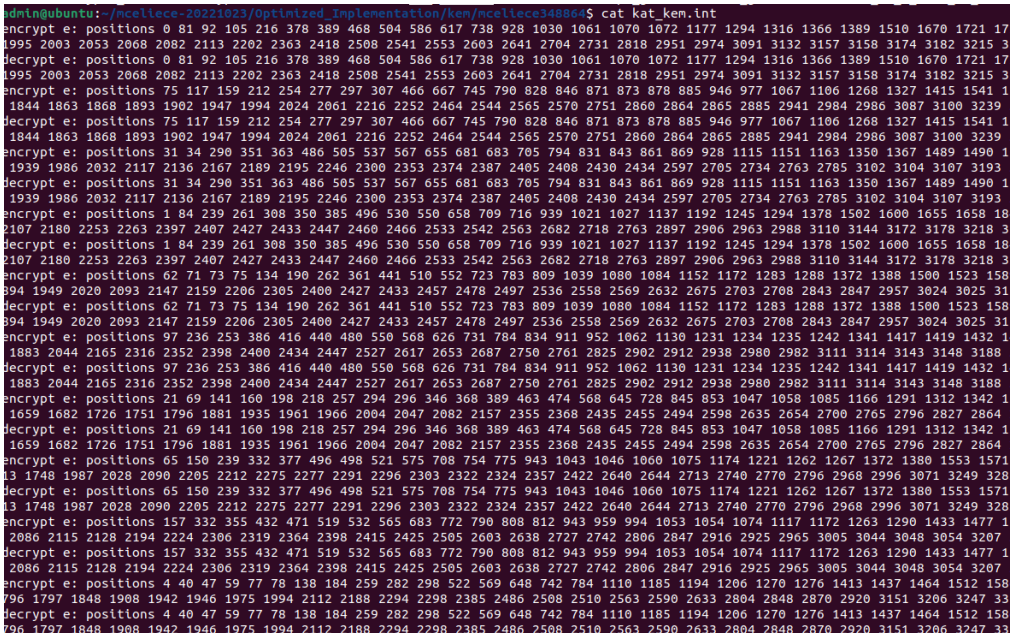


Figura 5.51 Resultado de kat_kem.int.

- Kat_kem.req: Misma función que la implementación de referencia.

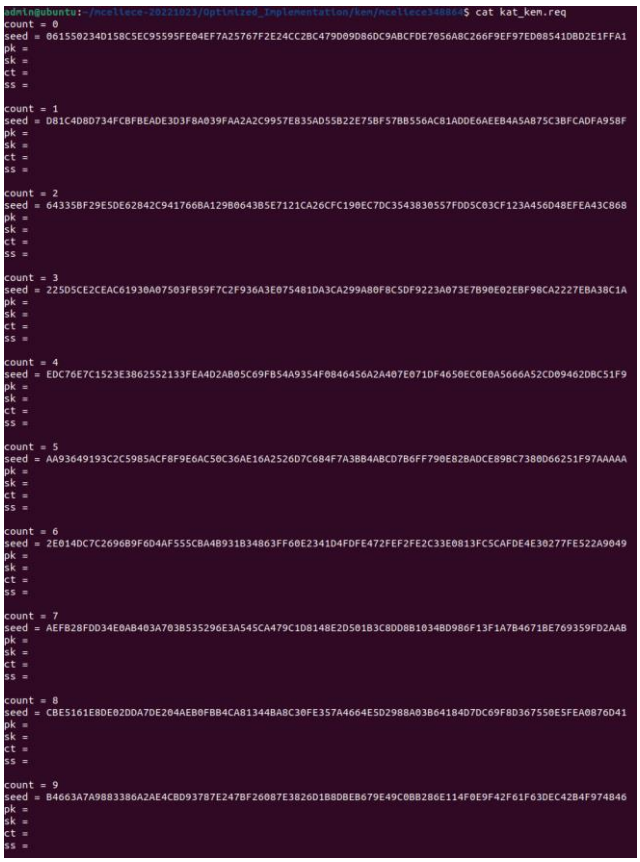


Figura 5.52 Resultado de kat_kem.req.

- Kat_kem.rsp: Misma función que la implementación de referencia

Figura 5.53 Resultado de Kat_kem.rsp,.

Muestra todos los parámetros de kat_kem.req, todos los datos almacenados están guardados en el archivo comprimido de la entrega.

Para Additional_Implementations no se va a tratar ya que es similar a los otros dos directorios y por lo tanto refleja datos similares.

Capítulo 6

Conclusiones

Reflexionando ha sido un proyecto que me ha hecho mejorar mi capacidad de captar información de fuentes fiables, como también obtener conocimientos nuevos en Linux y en criptografía. Al principio me surgió varias dudas por ser un tema nuevo tratado apenas en la asignatura Protocolos y Comunicaciones Seguras impuesta por mi tutor.

Decidí escoger este tema debido a que me daba curiosidad el funcionamiento de la computación cuántica como también pensar en cómo esta puede cambiar el mundo para bien o para mal. No todo ha sido un camino de rosas ya que ha habido algunas características que se sobrepasaba el plazo inicial como puede ser enunciar matemáticamente los algoritmos del punto cuatro, pero como no era el objetivo de mi TFG decidí no explicarlas, ya que el objetivo es tener una toma de contacto y experimentar con los algoritmos. Como conclusión de cuál es el algoritmo óptimo del concurso NIST tengo que decir que el finalista el algoritmo kyber según los datos arrojados es el más completo de los tres finalistas, aunque me quedo con las

ganas de realizar más pruebas para ver diversas diferencias entre los algoritmos.

Como implementación futura me gustaría hacer un análisis matemático de cada algoritmo además de realizar pruebas a individuales a cada uno.

Considero que he cumplido los objetivos establecidos en el TFG y aprendido una nueva rama que me puede servir en el futuro.

Capítulo 7

Referencias

[1] FREDY CHALA, Y. (2019). *Unad.* IMPORTANCIA DE LA APLICACIÓN DEL MECANISMO DE CIFRADO DE INFORMACIÓN EN LAS EMPRESAS PARA LA PREVENCIÓN DE RIESGOS COMO ATAQUES, PLAGIO Y PERDIDA DE CONFIDENCIALIDAD: https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/30745/yfchala..pdf

Azure Microsoft. (s.f). *Azure Microsoft*. Explicación de los cúbits: https://azure.microsoft.com/es-es/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-a-qubit/#qubit-vs-bit

Barbieri, A. (3 de Noviembre de 2022). *Orange*. ¿Se convertirá la computación cuántica en un problema de seguridad? Los retos que nos esperan: https://blog.orange.es/innovacion/computacion-cuantica-problema-seguridad/

Castellanos, L. R. (19 de Enero de 2017). *Seguridad Informática WordPress*. 6. Criptografía: https://lcseguridadinformatica.wordpress.com/2017/01/19/6-criptografia/

Chen, C., Danba , O., Hoffstein, J., Hülsing, A., Rijneveld, J., Schanck, J., . . . Zhang, Z. (30 de Marzo de 2019). *NTRU.* NTRU Algorithm Specifications And Supporting Documentation: https://ntru.org/f/ntru-20190330.pdf

Claramunt Carriles, S. (Mayo de 2022). *Escuela Politécnica Superior de Alicante.* Investigación sobre la computación cuántica: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/124691/1/Estudio_de_la_computacion_cuantica_en_los_diferent_Claramunt_Carriles_Sergio.pdf

Comisión Federal de Comercio. (s.f.). *Marco de ciberseguridad del NIST*. Qué es y como funciona EL MARCO DE CIBERSEGURIDAD DEL NIST: https://www.ftc.gov/es/guia-para-negocios/protegiendo-pequenos-negocios/ciberseguridad/marco-ciberseguridad-nist#top

Comisión federal de comercio. (s.f). *Comisión federal de comercio*. EL MARCO DE CIBERSEGURIDAD DEL NIST: https://www.ftc.gov/es/guia-para-negocios/protegiendo-pequenos-negocios/ciberseguridad/marco-ciberseguridad-nist

Delgado, S. (26 de Enero de 2023). *RSA se mantiene intacto frente al algoritmo de Shor y otros ataques cuánticos*. MCPRO: https://www.muycomputerpro.com/2023/01/26/rsa-intacto-algoritmo-shor-ataques-cuanticos#:~:text=RSA%20se%20mantiene%20intacto%20frente%20al%20algoritmo%20de%20Shor%20y%20otros%20ataques%20cu%C3%A1nticos

Domenech Belda, C. (2004). *BIBLIOTECA VIRTUAL MANUEL DE CERVANTES*. La escritura jeroglífica egipcia: https://www.cervantesvirtual.com/obra-visor/la-escritura-jeroglfica-egipcia-0/html/001c6860-82b2-11df-acc7-002185ce6064_2.html

EcuRed. (s.f). *EcuRed*. Máquina de Turing: https://www.ecured.cu/M%C3%A1quina_de_Turing

El Cedazo. (1 de Abril de 2014). *El Cedazo*. Computación Cuántica I – Introducción: https://eltamiz.com/elcedazo/2014/01/04/computacion-cuantica-i-introduccion/

El País. (s.f). *El País*. El País:

https://imagenes.elpais.com/resizer/00aRr553FHrPv7h11eRsVXQo4mE=/1960x0/filters:focal(53x134:63x144)/cloudfront-eu-central-1.images.arcpublishing.com/prisa/3FKNA3NWMRFJBOIDWNISFFW4KY.jpg

Farrán, J. (2016). *Revista de la Escuela de Ingerniería Informática de Segovia.* Criptografías post-cuántica: http://www.inf5g.uva.es/node/469

Frwiki. (s.f). *Frwiki*. Puerta de Toffoli: https://es.frwiki.wiki/wiki/Porte_de_Toffoli

Giematic . (s.f). *Giematic*. EasyRSA: https://giematic.etsisi.upm.es/EasyRSA/EasyRSA1.html

González Cornejo, J. (Marzo de 2020). *DocIRS Technology*. Puertas Lógicas Clásicas y Cuánticas: https://www.docirs.cl/Puertas_Circuitos_Cuanticos.asp

Gutiérrez, P. (28 de Diciembre de 2012). *Genbeta:dev*. ¿Qué es y como surge la criptografía?: un repaso por su historia: https://www.genbeta.com/desarrollo/que-es-y-como-surge-la-criptografia-un-repaso-por-su-historia

Hmong. (s.f). *Hmong*. Algoritmo de Grover: https://hmong.es/wiki/Grover%27s_algorithm

Huang, R. (15 de Junio de 2021). *Forbes.* Here's How Quantum Computers Will Really Affect Cryptocurrencies: https://www.forbes.com/sites/rogerhuang/2021/06/15/heres-how-quantum-computers-will-really-affect-cryptocurrencies/?sh=6e74a0853229

IBM. (1 de Marzo de 2021). *IBM*. Criptografía de clave pública: https://www.ibm.com/docs/en/ztpf/2020?topic=concepts-public-key-cryptography

Judson, T. (6 de Diciembre de 2017). *Algebra Abstracta: Teoría y Aplicaciones*. Teoría de Galois: http://abstract.ups.edu/aata-es/galois.html

Martínez Mateo, J. (Abril de 2008). *Universidad Politécnica Madrid.* Criptografía cuántica aplicada: https://oa.upm.es/1298/1/PFC_JESUS_MARTINEZ_MATEO.pdf

McEliece. (23 de Octubre de 2022). *McEliece*. Classic McEliece Implementation:

https://classic.mceliece.org/impl.html

Mena Viveros, I. (19 de Noviembre de 2013). *Artículo de Computación cuántica.* Computación cuántica: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/33329861/articulo_compcuantica-libre.pdf?1395964176=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DComputacion_Cuantica.pdf&Expires=1694658160&Signature=XL5N87iTH~TBkJvPCE4cGamzY27aYp6EfLF7Tu4YaE~fGu7k~77Zpm~7bCRJ

Moreland, K. (26 de Abril de 2022). *Ledger academy*. ¿Qué son las claves públicas y privadas?: https://www.ledger.com/es/academy/que-son-las-claves-publicas-y-privadas

Museu Informática. (2021). *Museu Informática*. Cifrado de César: https://museo.inf.upv.es/blog/2021/05/14/cifrado-de-cesar/

Numerentur Org. (s.f). *Numerentur Org*. Cifrado en bloque I: https://numerentur.org/cifrado-en-bloque/

Orange. (3 de Noviembre de 2022). *Orange.* ¿Se convertirá la computación cuántica en un problema de seguridad? Los retos que nos esperan: https://blog.orange.es/innovacion/computacion-cuantica-problema-seguridad/

Owasp. (s.f). *Owasp.* QKD BB84: https://owasp.org/www-pdf-archive/BB84.pdf

Pq-Crystals. (23 de Diciembre de 2020). *Pq-Crystals*. CRYSTALS Cryptographic Suite for Algebraic Lattices: https://pq-crystals.org/kyber/

Pq-Crystals. (23 de Diciembre de 2020). *Pq-Crystals.* CRYSTALS Cryptographic Suite for Algebraic Lattices: https://pq-crystals.org/kyber/

PQSecure. (2020). *PQSecure.* Overview of NIST Round 3 Post-Quantum cryptography

Candidates: https://www.pqsecurity.com/wp-content/uploads/2020/07/Round-3.pdf

PQSecure. (2020). *PQSecure.* Overview of NIST Round 3 Post-Quantum cryptography Candidates: https://www.pqsecurity.com/wp-content/uploads/2020/07/Round-3.pdf

Raposo Briceño, S. A. (2019). *Universidad Politécnica de Madrid.* Criptografía de curvas elípticas. Fundamentos matemáticos e implementación.: https://oa.upm.es/56215/1/TFG_SANTIAGO_ALFONSO_RAPOSO_BRICENO.pdf

Real Casa de la Moneda. (s.f). *Real Casa de la Moneda*. Infraestructura de clave pública: https://www.cert.fnmt.es/curso-de-criptografia/infraestructura-de-clave-publica

Real Casa de la Moneda. (s.f). *Real Casa de la Moneda*. Firma digital: https://www.cert.fnmt.es/curso-de-criptografia/criptografia-de-clave-asimetrica/firma-digital

Real Casa de la Moneda. (s.f). *Real Casa de la Moneda Fabrica Nacional de la Moneda y Timbre*. Criptografía de clave asimétrica: https://www.cert.fnmt.es/curso-de-criptografia/criptografia-de-clave-asimetrica

Salas Peralta, P., & Sanz Sáenz, Á. (15 de Mayo de 2000). *Universidad Politécnica de Madrid.* COMPUTACIÓN CUÁNTICA: NUEVAS PERSPECTIVAS: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/9946/Article009.pdf

Tecnología + Informática. (2021). *Tecnología + Informática*. Qué es Tecnología? Definición y evolución: https://www.tecnologia-informatica.com/que-es-tecnologia/

Urrego Urrego, J. J. (2019). *Intitución Universitaroa.* Método criptográfico para cifrar información usando los estados cuánticos de polarización de fotones individuales: https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/2090/Rep_Itm_mae_Urrego.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Villar , J. (Enero de 2017). *Web Mat Upc*. Informe eSAMCid sobre estructuras de acceso- 2.

Esquemas para compartir secretos: https://web.mat.upc.edu/jorge.villar/esamcid/rep/accs/reportaccessse2.html#x4-40002.

Villar Santos, J., Padró Laimón, C., & Sáez Moreno, G. (s.f). *Universidad Politecnica de Cataluña.* COMPARTICIÓN DE SECRETOS EN CRIPTOGRAFÍA : https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/9843/Article018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Wikimedia. (s.f). *Wikimedia*. Algoritmo de Shor: https://www.wikiwand.com/es/Algoritmo_de_Shor#Referencias

Wikipedia. (6 de Diciembre de 2022). *Wikipedia*. Infraestructura de clave pública: https://es.wikipedia.org/wiki/Infraestructura_de_clave_p%C3%BAblica

Wikipedia. (s.f). *Wikipedia*. Puertas Cuánticas: https://es.wikipedia.org/wiki/Puerta_cuántica

Xifré Solana, P. (2009). *Universidad Carlos III.* Antecedentes y perspectivas de estudio en historia de la Criptografía: https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/6173