

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

---

**Thesis Title**

---



*Author:*

**Davide DE ZUANE**

*Supervisor:*

**Dr. Paolo SANTINI**

October 4, 2024

*?Thanks to my solid academic training, today I can write hundreds of words on virtually any topic without possessing a shred of information, which is how I got a good job in journalism.?*

Dave Barry

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

# *Abstract*

Faculty Name

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Doctor of Computer Sciences

**Thesis Title**

by Davide DE ZUANE

The Thesis Abstract is written here (and usually kept to just this page). The page is kept centered vertically so can expand into the blank space above the title too...



# *Acknowledgements*

The acknowledgments and the people to thank go here, don't forget to include your project advisor...



# Contents

<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Acknowledgements</b>	<b>v</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 Fondamenti di Comunicazioni Sicure</b>	<b>5</b>
2.1 Teoria . . . . .	5
2.1.1 Hash Function . . . . .	5
2.1.2 Schemi crittografici . . . . .	6
Simmetrici . . . . .	7
Asimmetrici . . . . .	8
2.1.3 Confronto . . . . .	10
2.1.4 Sicurezza . . . . .	11
2.2 Applicazioni . . . . .	12
2.3 IPsec . . . . .	13
2.3.1 Architettura . . . . .	13
2.3.2 Security Association . . . . .	14
2.3.3 Negoziazione SA . . . . .	15
2.4 IKE . . . . .	17
2.4.1 <b>IKE_SA_INIT</b> . . . . .	17
2.4.2 IKE_AUTH . . . . .	18
2.4.3 CHILD_SA . . . . .	18
2.5 Problemi . . . . .	18
2.5.1 <b>IKE_INTERMEDIATE</b> . . . . .	19
2.6 Post-Quantum . . . . .	20
<b>3 Scenario</b>	<b>21</b>
3.1 Comunicazioni Satellitari . . . . .	21
3.1.1 Limitazioni . . . . .	22
3.1.2 Stato Attuale . . . . .	23
3.2 Come procediamo . . . . .	23

3.3	Benchmarking . . . . .	23
3.4	Tuttavia . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Hummingbird</b>	<b>25</b>
4.1	Progettazione . . . . .	25
4.1.1	Requisiti . . . . .	25
4.1.2	Architettura . . . . .	25
4.2	Implementazione . . . . .	25
4.2.1	Strumenti . . . . .	25
4.2.2	Codice . . . . .	26
4.2.3	Sfide . . . . .	26
4.3	Analisi . . . . .	26
<b>A</b>	<b>IKEv2 Notation</b>	<b>27</b>
A.0.1	Authentication . . . . .	27
A.1	Key Derivation . . . . .	27
A.1.1	IKE SA . . . . .	27
A.1.2	IPsec SA . . . . .	28
A.2	Security Association Payload . . . . .	28



# List of Figures

2.1	Funzionamento di uno schema crittografico . . . . .	7
2.2	Scambio di Chiave Difie-Hellman . . . . .	9
2.3	Esplosione combinatoria . . . . .	10
2.4	Public Key Infrastructure . . . . .	11
2.5	Stack TCP/IP . . . . .	13
2.6	IPsec Protocol Suite . . . . .	14
2.7	Security Association bidirezionali . . . . .	15
2.8	Fasi di Negoziazione del Protocollo IKEv2 . . . . .	17
2.9	Drop Pacchetti . . . . .	18
2.10	Scambio nuovo . . . . .	19
3.1	Orbite dei satelliti . . . . .	21
4.1	Formato IKE Header . . . . .	26



# List of Tables

2.1	Security Levels definiti dal NIST . . . . .	12
2.2	Tabella dei parametri e delle descrizioni . . . . .	17
2.3	Tabella dei parametri e delle descrizioni . . . . .	18
A.1	Chiavi e loro utilizzo . . . . .	28



# List of Abbreviations

<b>DH</b>	<b>D</b> iffie <b>H</b> ellman
<b>KE</b>	<b>K</b> ey <b>E</b> xchange
<b>PQ</b>	<b>P</b> ost <b>Q</b> uantum
<b>IKE</b>	<b>I</b> nternet <b>K</b> ey <b>E</b> xchange
<b>KEM</b>	<b>K</b> ey <b>E</b> ncapsulation <b>M</b> echanism
<b>PRF</b>	<b>P</b> seudo <b>R</b> andom <b>F</b> unction
<b>MTU</b>	<b>M</b> aximum <b>T</b> ransmission <b>U</b> nit
<b>ISP</b>	<b>I</b> nternet <b>S</b> ervice <b>P</b> rovider



# List of Symbols

$ $	concatenazione	
$a$	distance	m
$P$	power	W (J s <sup>-1</sup> )
$\omega$	angular frequency	rad





*For/Dedicated to/To my...*



# Chapter 1

## Introduction

Introduzione al quantum computer e spiegare il nome, ovvero perchè si basa sui principi fisici. Confronto con il computer classico utilizzato per calcolare la classe di complessità di un problema

L'attuale crittografia a chiave pubblica è minacciata da due algoritmi pionieri in questo campo ovvero quello di Grover e Shor Negli ultimi anni la minaccia del quantum computing, in particolare la loro potenza di calcolo insieme agli algoritmi di Grover e Shor ha ribaltato quelle che sono le carte in tavola, dato che consentono di risolvere in tempo polinomiale i problemi su cui si basano gli schemi crittografici più diffusi tra cui il problema del logaritmo discreto alla base di DH e la fattorizzazione di numeri primi alla base di RSA.

Questo ha spinto a introdurre nuovi schemi di firma basati su problemi matematici più complessi, tra questi abbiamo i lattice-based, hash-based, ecc.. Recentemente tra quelli proposti ne sono stati standardizzati diversi, tra questi abbiamo: kyber, dilithium, classim mceliece

## Criticità

- Tradeoff tra aumento della complessità con dimensioni chiave e velocità delle operazioni
- Requisiti della rete e in generale delle applicazioni
- Implementazioni
- Affidabilità e dunque transizione da uno all'altro.

Ora il fatto che questi problemi si siano dimostrati computazionalmente onerosi non li rende ottimali anche per l'utilizzo pratico su tutte quelle che sono le infrastrutture di rete esistenti.

Questo perchè per contrastare l'incredibile potenza di calcolo del quantum computer occorre rendere il problema più complesso che in generale potrebbe

portare e dimensioni delle chiavi molto grandi oppure ad operazioni di keygen, codifica e decodifica molto lonte.

Dunque l'algoritmo dal punto di vista matematico soddisfa quelli che sono i requisiti tuttavia non è detta che soddisfi quelli che sono i requisiti che lo rendano adatto ad essere applicato a contesti reali come quello delle reti di computer.

Oltre ad un problema computazionale abbiamo anche un problema di fiducia dei confronti di questi algoritmi, ovvero dato che sono stati appena introdotti l'implementazione potrebbe peccare da qualche punto di vista Inoltre fare una transizione così drastica risulta molto problematico.

Io la metterei sì dal punto di vista della ricerca ma anche dal punto di vista implementativo, ovvero non basta definire solamente nuovi schemi che dal punto di vista teorico possono essere sicuri ma questi devono poi trovare un'utilizzo pratico.

L'utilizzo pratico va in contro a diverse problematiche in particolare ha requisiti più stringenti che al momento della definizione matematiche dello schema non vengono presi in considerazione. Si hanno constraint sia di usabilità che di fiducia nei loro confronti poichè l'approccio standard è quello di aumentare le dimensioni delle chiavi in modo tale da contrapporsi all'aumento di capacità computazionale del quantum computer

Nel caso reale l'aumento di dimensione ha effetti significativi sulle prestazioni della rete dato che possono portare a problematiche di frammentazione. E va considerata anche la latenza dovuta alle operazioni di cifratura e altre cose

## **Contributo Apportato**

L'obiettivo di questo lavoro è andare a vedere quali sono gli effetti di applicare primitive di questo tipo nei protocolli maggiormente diffusi per la sicurezza delle comunicazioni. In particolare considerando il caso specifico di comunicazioni satellitari, che hanno constraint importanti sul numero di pacchetti da scambiare e di conseguenza sulla dimensione di quest'utilimi

Una volta determinati quelli che sono gli effetti, siamo passati a verificare se il protocollo utilizzato rispetto alla sua applicazione, fosse quello ideale. In particolare dalle conclusioni del benchmarking siamo arrivati ad una prima implementazione, molto spartana, di quella che è una versione minimale di IKE.

## **Organizzazione della Tesi**

Il proseguo della tesi sarà strutturato nel seguente modo:

- Capitolo 2: si danno le fondamenta matematica delle sicurezza nelle comunicazioni sicure e di come queste vengono applicate nelle comunicazioni digitali. In particolare prendiamo in esame il caso di IPsec e di un suo protocollo ausiliario utilizzato per negoziarne i parametri di sicurezza.
- Capitolo 3: descrizione di quello che è lo scenario applicativo che si prende in considerazione



## Chapter 2

# Fondamenti di Comunicazioni Sicure

*In questo capitolo esamineremo le problematiche relative alla sicurezza nelle comunicazioni. Inizieremo con un'analisi degli strumenti matematici fondamentali che sono alla base della protezione dei dati, esplorando le tecniche crittografiche e i loro principi teorici. Successivamente, ci concentreremo su come queste tecniche vengono effettivamente applicate per garantire la sicurezza nelle comunicazioni sulle reti di computer.*

## 2.1 Teoria

Dalla crittografia classica, come il cifrario di Cesare, fino alle tecniche più sofisticate del ventesimo secolo, come i sistemi di cifratura a chiave pubblica, la storia della crittografia è caratterizzata da una continua evoluzione e innovazione. Le fondamenta sui cui si basa non sono cambiate, andiamo a vedere strumenti matematici che ne fanno parte.

### 2.1.1 Hash Function

Una funzione **hash crittografiche** è una funzione matematica che prende in input un messaggio di lunghezza arbitraria e restituisce un output di lunghezza fissa, noto come digest.

$$H : \{0,1\}^* \rightarrow \{0,1\}^n \quad (2.1)$$

- $\{0,1\}^*$ : rappresenta l'insieme di tutte le stringhe binarie di lunghezza arbitraria.
- $\{0,1\}^n$ : rappresenta l'insieme delle stringhe binarie di lunghezza fissa  $n$ .

Le funzioni di hash crittografiche sono strumenti fondamentali nel campo della sicurezza informatica, progettate per garantire l'integrità e l'autenticità dei dati. Per questo motivo, a questo tipo di funzioni sono richieste le seguenti proprietà:

- **Resistenza alle collisioni:** devono essere progettate in modo tale che sia computazionalmente impraticabile invertire il processo, ovvero, dato il digest è difficile risalire al messaggio che lo ha prodotto.
- **Proprietà di diffusione:** una leggera variazione dell'input deve produrre un hash completamente diverso, questa è fondamentale per garantire che gli attaccanti non possano prevedere o manipolare il valore di hash a seguito di modifiche all'input.

Aggiungere grafico sulle one way function

### 2.1.2 Schemi crittografici

Uno schema di cifratura è un insieme di algoritmi e funzioni che definisce come trasformare un messaggio in chiaro (plaintext) in un messaggio cifrato (ciphertext) e viceversa, al fine di garantire la confidenzialità e la sicurezza delle comunicazioni. Formalmente possiamo rappresentarlo come una quintupla:

$$(\mathcal{P}, \mathcal{C}, \mathcal{K}, E, D)$$

- $\mathcal{P}$ : Insieme dei messaggi in chiaro (plaintext).
- $\mathcal{C}$ : Insieme dei messaggi cifrati (ciphertext).
- $\mathcal{K}$ : Insieme delle chiavi utilizzate per la cifratura e decifratura, *key space*.
- $E : \mathcal{K} \times \mathcal{P} \rightarrow \mathcal{C}$ : Funzione di cifratura.
- $D : \mathcal{K} \times \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{P}$ : Funzione di decifratura.

Deve esistere una relazione inversa tra le operazioni di cifratura e decifratura:

$$D(k, E(k, m)) = m \quad \forall m \in \mathcal{P}, k \in \mathcal{K} \quad (2.2)$$

Lo schema in Fig. 2.1, mostra il funzionamento generale di uno schema crittografico. Tuttavia andando a caratterizzare le chiavi utilizzate nelle operazioni di cifratura e decifratura possiamo dare una prima classificazione:



- se  $K_1 = K_2$  allora si parla di un schema di crittografia *simmetrico*.
- se  $K_1 \neq K_2$  allora si parla di schema di crittografia *asimmetrico*.

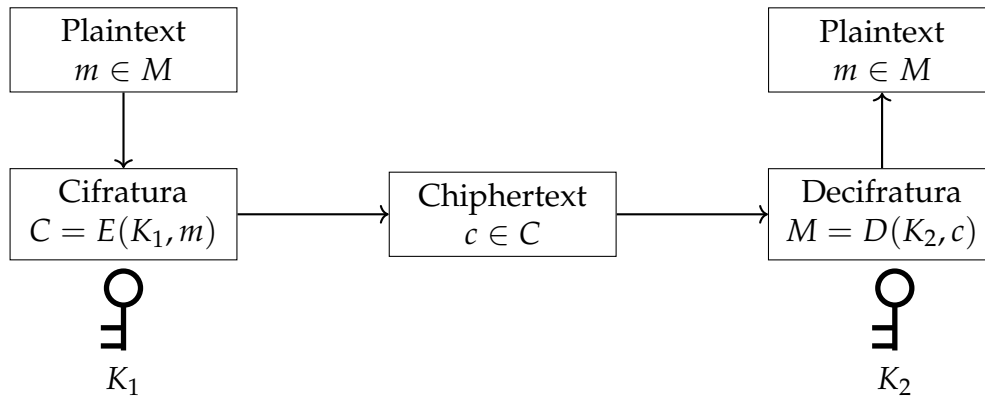


FIGURE 2.1: Funzionamento di uno schema crittografico

### Simmetrici

Come descritto precedentemente, in uno schema simmetrico si utilizza la stessa chiave sia per le operazioni di cifratura che di decifratura. Ciò implica che le due parti coinvolte nella comunicazione debbano possedere la medesima chiave segreta, nota anche come chiave pre-condivisa (PSK - Pre-Shared Key). Questa caratteristica fondamentale rende gli schemi di crittografia simmetrica particolarmente veloci ed efficienti, esempi ne sono AES e DES.

Le loro caratteristiche li rendono ideali per:

- *Cifratura di Dati*: proteggere file e database memorizzati su disco, garantendo che le informazioni sensibili rimangano riservate anche in caso di accesso non autorizzato. Sia proteggere i dati mentre vengono trasmessi su reti.
- *HMAC* (Hash-based Message Authentication Code): combinati con funzioni di hash, gli algoritmi simmetrici possono generare codici HMAC, che forniscono autenticità e integrità ai messaggi. Fondamentale per garantire che i dati non vengano manomessi durante la trasmissione.

### Asimmetrici

In uno schema di cifratura asimmetrica, detto anche a **chiave pubblica**, lo spazio delle chiavi  $\mathcal{K}$  è costituito da una coppia di chiavi  $(k_{\text{pub}}, k_{\text{priv}})$ , dove:

- La chiave pubblica  $k_{\text{pub}}$  viene condivisa liberamente e utilizzata da chiunque per cifrare messaggi destinati al proprietario della chiave.
- La chiave privata  $k_{\text{priv}}$  è mantenuta segreta dal proprietario e viene utilizzata per decifrare i messaggi cifrati con la corrispondente chiave pubblica.

Quindi le due funzioni si riscrivono come:

$$E : \mathcal{K}_{\text{pub}} \times \mathcal{P} \rightarrow \mathcal{C} \quad (2.3)$$

$$D : \mathcal{K}_{\text{priv}} \times \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{P} \quad (2.4)$$

Le due chiavi sono matematicamente legate, ma è computazionalmente difficile ottenere la chiave privata a partire da quella pubblica. Il funzionamento si basa sul concetto di **trapdoor** che rende possibile una funzione (come la cifratura o la decifratura) semplice per chi conosce un segreto (la chiave privata) ma estremamente difficile per chi non lo conosce.

Uno dei principali utilizzi della crittografia asimmetrica è il **Key-Exchange**, il quale consente di scambiarsi un'informazione segreta su un canale pubblico. La procedura più conosciuta è quella proposta da *Diffie-Hellman* ed è mostrata in Fig. 2.2

Le **firme digitali**, sono un meccanismo chiave per garantire l'autenticità e l'integrità dei messaggi. In questo caso si fornisce sia il messaggio che un digest del messaggio firmato, in questo modo chi lo riceve può utilizzare la

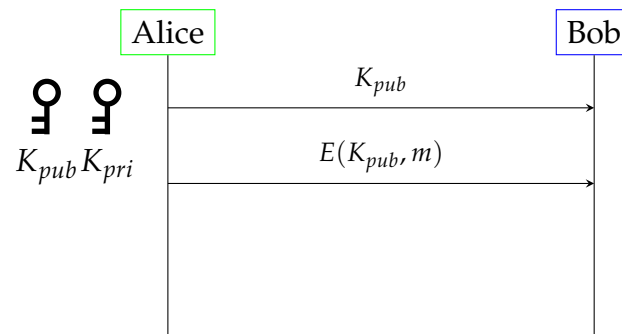


FIGURE 2.2: Scambio di Chiave Difie-Hellman

chiave pubblica per verificare che l'hash firmato equivalga a quello calcolato. Questa pratica si utilizza per garantire integrità e autenticità.

### 2.1.3 Confronto

#### Key Distribution

L'assunto che si è fatto in entrambi le tipologie di schema è che l'altra parte della comunicazione avesse ottenuto in qualche modo la chiave. Tuttavia la distribuzione delle chiavi è un problema importante per il crittosistema.

Le distribuzione delle chiavi per crittosistemi simmetrici deve avvenire tramite un canale segreto, per questo motivo si utilizzano le seguenti modalità:

- *Manuale*: vengono installate manualmente coppie di chiavi per ogni nodo che si vuol far comunicare, se si vogliono far comunicare  $n$  nodi sono necessarie  $n(n-1)/2$  chiavi. L'approccio è robusto ma impraticabile per reti di grandi dimensioni come mostrato in Fig. 2.3.
- *Key Distribution Center (KDC)*: da un'approccio decentralizzato si passa ad uno centralizzato, in cui è presente un server che fa da intermediario fidato per la distribuzione delle chiavi.

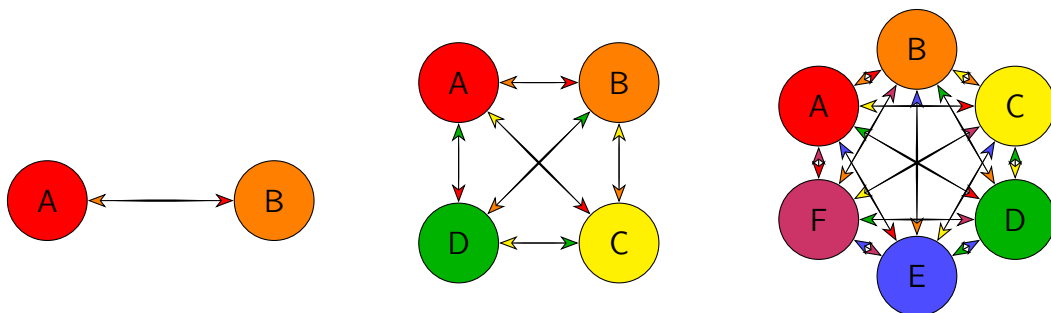


FIGURE 2.3: Esplosione combinatoria

Per loro natura le chiavi pubbliche sono liberamente distribuite, non è dunque necessario un canale segreto. Tuttavia in questo caso si ha il problema dell'autenticità, ovvero che la chiave provenga realmente dalla fonte dichiarata. Per questo nasce la *Public Key Infrastructure (PKI)*, che tramite l'utilizzo dei certificati X.509 consente la distribuzione sicura di chiavi pubbliche. Questo approccio consente una gestione scalabile delle chiavi.

#### Attacchi Quantum

Gli schemi asimmetrici sono vulnerabili alla minaccia del quantum computer. Parlare degli algoritmi di Shor e ....

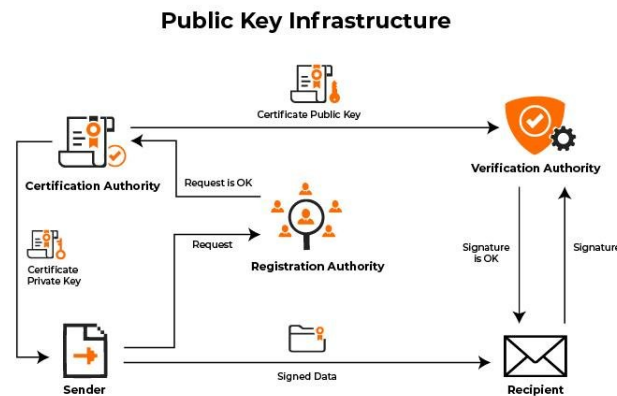


FIGURE 2.4: Public Key Infrastructure

### 2.1.4 Sicurezza

Il **security level** è una misura della forza che una primitiva crittografica raggiunge rispetto ad attacchi. Solitamente viene espresso come un numero di “bit di sicurezza”, dove  $n$ -bit di sicurezza significa che l’attaccante dovrebbe eseguire  $2^n$  operazioni per romperlo.

- Per i cifrari simmetrici il livello di sicurezza è pari alla dimensione del key-space. Equivale ad un attacco a forza bruta.
- La sicurezza dei cifrari simmetrici si basa su problemi matematici noti. Tuttavia, gli attacchi contro gli attuali sistemi a chiave pubblica sono sempre più veloci della ricerca a forza bruta dello spazio delle chiavi.

Il NIST (National Institute of Standards and Technology) ha introdotto livelli di sicurezza, definiti in *Tabella 2.1* per gli algoritmi di cifratura asimmetrica e post-quantistica come parte della sua iniziativa per standardizzare algoritmi che resistano anche ai computer quantistici.

Security Level	Descrizione
<b>Livello 1</b>	Sicurezza equivalente alla cifratura simmetrica con chiavi da 128 bit, come AES-128.
<b>Livello 2</b>	Sicurezza equivalente ad attacchi contro SHA-256, con complessità circa pari a 128 bit. Leggermente più sicuro del livello 1.
<b>Livello 3</b>	Sicurezza equivalente alla cifratura simmetrica con chiavi da 192 bit, come AES-192.
<b>Livello 4</b>	Sicurezza equivalente ad attacchi contro SHA-384. Leggermente più sicuro del Livello 3.
<b>Livello 5</b>	Sicurezza equivalente alla cifratura simmetrica con chiavi da 256 bit, come AES-256.

TABLE 2.1: Security Levels definiti dal NIST

## 2.2 Applicazioni

Le reti, per loro natura, rappresentano un mezzo di comunicazione intrinsecamente insicuro, soprattutto quando operano in modalità broadcast. In questo contesto, la crittografia riveste un ruolo cruciale nel garantire la sicurezza dei dati scambiati tra entità remote. I crittosistemi, ossia le applicazioni crittografiche, integrano algoritmi di cifratura, autenticazione e gestione delle chiavi per fare in modo che vengano rispettati i requisiti di sicurezza per le informazioni trasmesse.

Il modello di riferimento per la comunicazione su Internet è il modello **TCP/IP**, il quale suddivide il processo di trasmissione dei dati in vari livelli, ciascuno con delle funzioni specifiche che non si sovrappongono con quelle degli altri livelli. Come mostrato in *Figura ??*, è possibile applicare la sicurezza ai vari livelli della pila e di lato sono riportati i protocolli che vengono utilizzati.

- **SSH (Secure Shell)**: Protegge l'accesso remoto e il trasferimento di file, fornendo autenticazione e cifratura.
- **TLS (Transport Layer Security)**: permette di instaurare una connessione TCP sicura. Viene utilizzato per cifrare e autenticare i dati tra client e server.
- **IPsec (Internet Protocol Security)**: Protegge i pacchetti IP scambiati tra due nodi, fornendo autenticazione, integrità e cifratura.

Ogni protocollo avrà le proprie caratteristiche, tuttavia fare sicurezza a L3 dello stack TCP/IP offre un vantaggio significativo: poiché tutti gli strati

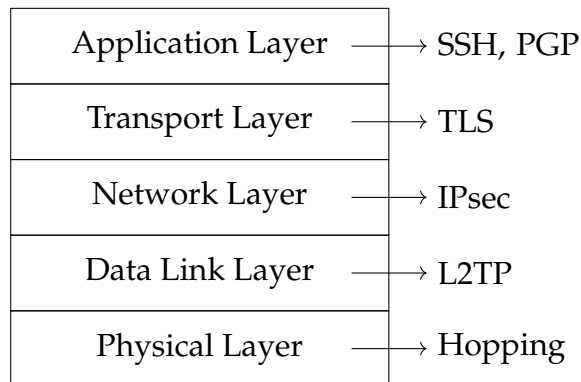


FIGURE 2.5: Stack TCP/IP

superiori dipendono da esso per la trasmissione dei dati, non è necessario apportare modifiche ai singoli protocolli o applicazioni che si basano su di esso. Questo consente di implementare soluzioni di sicurezza centralizzate e trasparenti, senza dover intervenire su ciascun servizio o applicazione a livello più alto.

## 2.3 IPsec

IPsec (Internet Protocol Security) è un insieme di protocolli standard, rappresentati in *Figura 2.6*, utilizzati in modo tale da fornire meccanismi per l'autenticazione, la cifratura e l'integrità dei dati trasmessi tra due o più dispositivi, proteggendo così le comunicazioni IP da intercettazioni e manomissioni.

### 2.3.1 Architettura

Come definito dall'RFC 1825, l'architettura di IPsec è composta dai seguenti componenti:

- **AH (Authentication Header):** si tratta di un protocollo di sicurezza che fornisce autenticazione e integrità dei dati, garantendo che i pacchetti non vengano modificati durante la trasmissione. Non offre cifratura, quindi i dati rimangono in chiaro.
- **ESP (Encapsulating Security Payload):** protocollo che fornisce cifratura per garantire la riservatezza dei dati, oltre a integrità e autenticazione opzionale. ESP è il protocollo più utilizzato per garantire sia sicurezza che riservatezza.

- **SA (Security Association):** un insieme di parametri che definisce come i dati devono essere protetti durante la comunicazione tra due entità su una rete. Ogni SA contiene le informazioni necessarie per stabilire e mantenere una connessione sicura.
- **IKE (Internet Key Exchange):** protocollo che consente di negoziare, autenticare e distribuire dinamicamente le chiavi crittografiche che vengono poi impiegate dai protocolli di sicurezza per proteggere le comunicazioni.
- **Algoritmi:** gli algoritmi crittografici e di hashing utilizzati per ottenere sicurezza.

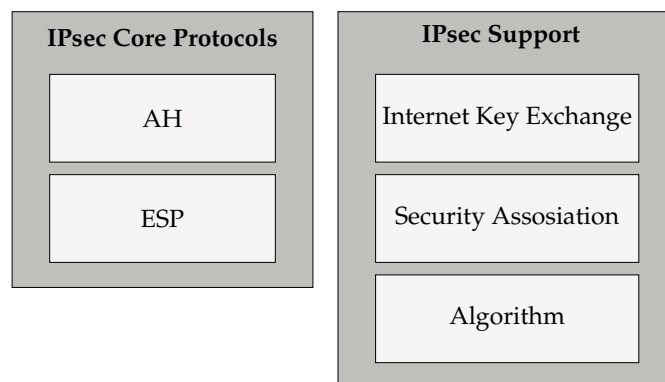


FIGURE 2.6: IPsec Protocol Suite

### 2.3.2 Security Association

IP è un protocollo *stateless*, ovvero non mantiene informazioni o stato relativo alle connessioni o ai pacchetti che gestisce. Tuttavia affinché IPsec possa garantire la sicurezza è necessario che mantenga il contesto di ogni connessione, le principali motivazioni sono:

- *Replay Protection:* per evitare attacchi di tipo replay, IPsec tiene traccia dei numeri di sequenza dei pacchetti, un'informazione di stato che va mantenuta per ogni connessioni e che IP non fa nativamente.
- *Connessioni Multiple:* in uno scenario di rete complesso, un singolo dispositivo potrebbe avere più connessioni sicure in corso simultaneamente, ognuna delle quali ha i propri parametri di sicurezza. IPsec deve tenere traccia di queste informazioni per sapere come trattare i pacchetti in entrata e uscita in base alla connessione a cui appartengono.



- *Protezione*: i protocolli di sicurezza AH e ESP richiedono di conoscere le chiavi crittografiche corrette e gli algoritmi utilizzati per cifrare e decifrare i pacchetti.

IP diventa in grado di mantenere un'insieme di informazioni di stato grazie al concetto di *Security Association* (SA). Più precisamente si tratta di un'insieme di parametri che servono per associare a ciascun canale uno stato condiviso tra le entità coinvolte nella comunicazione, tra questi abbiamo:

- *Security Parameter Index* (SPI): un'identificatore della SA.
- *Destination Address*: serve all'host per determinare quale SA utilizzare.
- *Lifetime*: il tempo di vita della SA, si obbliga a refresh periodici.
- *Protocol Identifier*: determina il tipo di protezione da applicare ai pacchetti, dunque anche chiavi e algoritmi associati.
- Altri parametri opzionali, per una lista completa fare riferimento all'RFC.

La SA è caratterizzata dall'essere un canale *simplex*, dunque al fine di stabilire un canale di comunicazione bidirezionale IPsec tra due entità occorrono due SA unidirezionali di verso opposto. La *Figura 2.7* mostra il tunnel virtuale in esecuzione tra i due host.

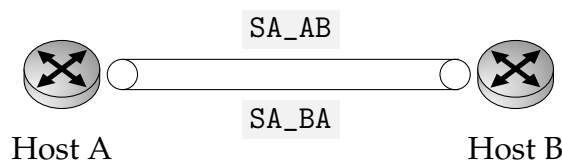


FIGURE 2.7: Security Association bidirezionali

### 2.3.3 Negoziazione SA

In un contesto come quello delle reti potremmo avere che lo stesso nodo ha connessioni IPsec multiple, le SA consentono di distinguere e identificare in modo univoco la configurazioni di sicurezza da applicare alla comunicazione. Tuttavia queste SA come si configurano?. IPsec prevede tecniche di negoziazione delle SA di tipo:

- *Manuale*: occorre configurare manualmente le chiavi e le impostazioni di sicurezza per ciascun dispositivo o punto finale di comunicazione.

- *Automatico*: si utilizzano protocolli per stabilire automaticamente le chiavi di crittografia e le politiche di sicurezza senza intervento umano diretto.

L'utilizzo di tecniche di negoziazione automatica offre un approccio sicuro, flessibile e scalabile alla gestione delle Security Association, un esempio di questo è IKE. Andiamo a vedere nel dettaglio IKE nella prossima sezione.

## 2.4 IKE

Questo protocollo definisce una serie di scambi, mostrati in *Figura 2.8*, al termine del quale i due peer avranno negoziati i parametri di sicurezza e le chiavi crittografiche per una SA.

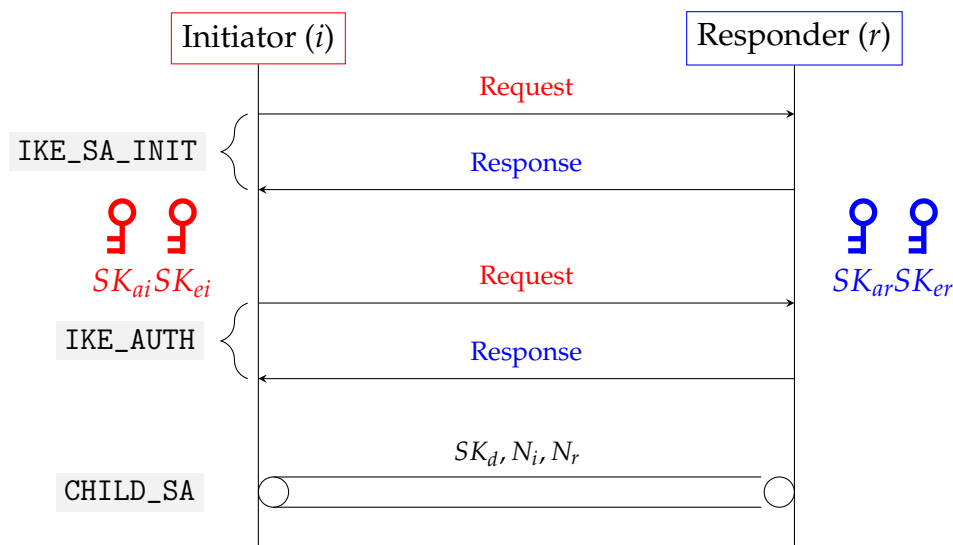


FIGURE 2.8: Fasi di Negoziazione del Protocollo IKEv2

### 2.4.1 IKE\_SA\_INIT

Lo scopo di questa prima fase è quello di creare una **IKE SA**, che consenta di rendere sicure i successivi scambi di dati al fine di realizzare una **IPsec SA**. Dunque funge da apripista al fine di stabilire quelli che sono i parametri di sicurezza al fine di avere una comunicazione sicura. Per questo motivo in questo scambio i peer si scambiano le seguenti informazioni:

TABLE 2.2: Tabella dei parametri e delle descrizioni

Parametro	Descrizione
SA	Security Association, vengono negoziati i parametri per la SA
KE	Key Exchange, e nel caso classico è l'esponente DH
N	Nonce

Al termine di questo scambio i due peer ottengono il *DH Shared Secret* (indicato con  $g^{ir}$ ), il quale insime ai nonce, consentirà di ottenere quelli che sono i parametri di sicurezza della *IKESA* al fine di instauare un canale sicuro, per approfondimenti in [appendice](#).

### 2.4.2 IKE\_AUTH

Il risultato della fase precedente è un canale sicuro su cui comunicare, in quanto è cifrato e autenticato. Si questo hanno luogo gli scambi per instaurare la IPsec SA. In questa fase i nodi si autenticano mutuamente:

TABLE 2.3: Tabella dei parametri e delle descrizioni

Parametro	Descrizione
<i>AUTH</i>	Payload che deve essere firmato affinché ci sia autenticazione
<i>CERT</i>	Si allega il certificato digitale per la chiave pubblica
<i>CERTQ</i>	Si fa richiesta al peer di fornire il certificato

Tutto il contenuto appena descritto è protetto mediante le chiavi segrete di quella direzione. Ciò è indicato mediante la notazione  $SK\{\dots\}$ . La modalità di autenticazione può essere: PSK, EAP oppure mediante chiave pubblica.

### 2.4.3 CHILD\_SA

## 2.5 Problemi

IKEv2 utilizza come protocollo a livello trasporto UDP per inoltrare i propri messaggi. La maggior parte dei messaggi che i peer si scambiano hanno dimensioni relativamente piccole e quindi che non eccedono l'MTU di un pacchetto IP, tuttavia abbiamo degli scambi che richiedono un trasferimento di dati abbastanza grandi.

Per esempio nel caso di autenticazione tramite pubkey nella fase di `IKE_AUTH` è necessario trasferire il proprio certificato che in base allo schema di firma utilizzato può arrivare anche a diversi Kbyte di dimensione. In questi casi si verifica la frammentazione a livello IP.

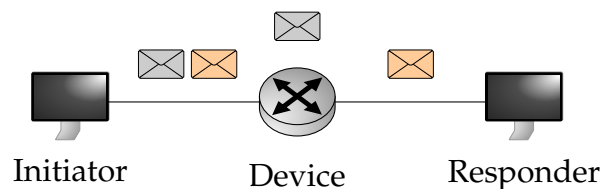


FIGURE 2.9: Drop Pacchetti

Diversi test hanno mostrato che nel caso in cui i peer si trovino in presenza di CGNAT potrebbero non instaurarsi le SA. Questo è dovuto al fatto che i device degli ISP non consentono ai frammenti IP di passare attraverso di loro,

ovvero scartano i pacchetti e di conseguenza bloccano le comunicazioni IKE. Questo è riportato schematicamente in Fig. 2.9. Questo drop dei pacchetti avviene perchè esistono numerosi vettori di attacco che fanno affidamento sulla frammentazione IP, per questo motivo gli ISP operano un filtro su questa tipologia di pacchetti. Anche se in teoria uno dei requisiti del CGNAT definito dagli RFC è proprio consentire la frammentazione.

Per risolvere questa problematica e dunque consentire il passaggio dei messaggi attraverso i dispositivi di rete che non consentono il passaggio degli IP fragment attraverso di loro nell' RFC 7283 viene introdotta la *IKEv2 Message Fragmentation*. In cui la frammentazione dei messaggi è gestita direttamente da parte di chi implementa IKEv2

### 2.5.1 IKE\_INTERMEDIATE

Per evitare che nel trasferimento di grandi dati ciò avvenga viene introdotto uno scambio aggiuntivo. Questo scambio è introdotto per quei casi in cui la dimensione dei dati da trasferire ecceda la dimensione massima che causerebbe la frammentazione IP. Questo scambio va fatto dopo la `IKE_INIT_SA` e prima della `IKE_AUTH` in questo modo è sia autenticato che cifrato tramite le chiavi negoziate dal primo scambio.

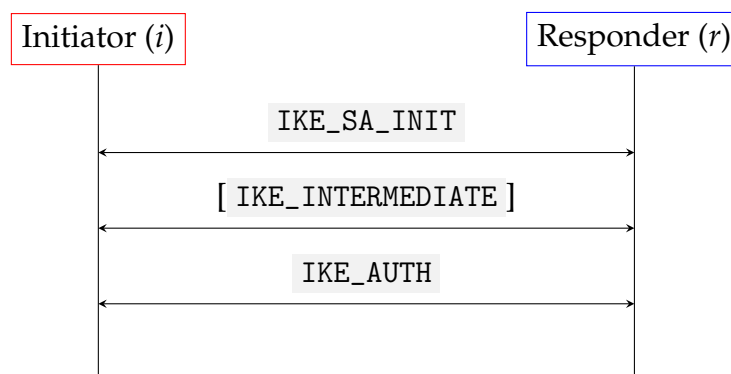


FIGURE 2.10: Scambio nuovo

Questo scambio è posizionato qui in quanto nella `IKE_SA_INIT` per motivi di sicurezza non è possibile applicare la frammentazione. Di solito i messaggi sono piccoli abbastanza da non causare la frammentazione IP, tuttavia questo potrebbe cambiare se si utilizzano scambi di chiave QC-resistant; in quanto hanno chiavi pubbliche larghe e che quindi causerebbero frammentazione IP.

Per questo viene aggiunto questo scambio che viene utilizzato per trasferire grandi quantità di dati.

L'utilizzo principale di questo scambio è quello di trasferire le chiavi pubbliche QC-resistant, tuttavia in generale può essere utilizzato per trasferire qualsiasi tipologia di dato. Quindi il principale utilizzo è quello di fare un **enforcing** delle chiavi negoziate tramite DH al fine di renderle QC-resistant. Infatti se durante questo scambio si scambiano altre chiavi allora le coppie  $\{SK_{a[i/r]}, SK_{e[i/r]}\}$  vengono aggiornate.

Permette di realizzare Multiple Key Exchange Gli scambi di chiave aggiuntivi vengono aggiunti alla proposal tramite `PQ_KEM_1`

Lo scambio `IKE_FOLLOWUP_KE` è introdotto specificatamente per trasferire dati sulla chiavi addizionali da realizzare in una CHILD SA. In questo caso le chiavi aggiuntive vengono utilizzate per aggiornare il KEYMAT

- flag `IKE_FRAGMENTATION_SUPPORT` : il peer dice di supportare la frammentazione IKEv2, affinché venga utilizzata entrambi i peer devono supportarla.
- flag `INTERMEDIATE_EXCHANGE_SUPPORT` : il peer dice di supportare gli scambi intermedi

Una volta terminati gli scambi, per proteggere lo scambio `IKE_AUTH` e gli scambi successivi vengono utilizzate le ultime chiavi calcolate. Dato che i dati trasferiti in questi scambi aggiuntivi vanno autenticati si aggiungono all' `AUTH` payload che poi andrà

Il supporto per lo scambio aggiuntivo viene comunicato aggiungendo all'interno dell' `IKE_SA_INIT` il flag `IKE_INT_SUP` (che sta per Intermediate Exchange Support). Se anche il responder lo supporta lo includerà nel messaggio di risposta dello scambio.

Considerazioni, L'IKE fragmentation viene introdotta a causa del NAT tuttavia nel nostro caso di satelliti non ha senso utilizzarla in quanto non credo che si utilizzi il NAT soprattutto perchè introduce ritardi dovuti alla traduzione degli indirizzi

## 2.6 Post-Quantum

Un solo KEM con Kyber L1 usando come suite AES\_GCM ha vabene come certificato dilithium L1

Nel KEM quanti cifrano?

Cioè l'initiator manda il certificato e poi il responder cifra

## Chapter 3

# Scenario

### 3.1 Comunicazioni Satellitari

Le comunicazioni satellitari sono una fondamenta delle infrastrutture moderne, abilitando una vasta gamma di servizi. Negli ultimi decenni, con l'aumento della domanda di connettività globale e l'espansione delle reti di telecomunicazioni, i satelliti sono diventati strumenti essenziali per garantire una copertura estesa, specialmente in aree remote dove le infrastrutture terrestri sono limitate o inesistenti. L'emergere delle costellazioni di satelliti in orbita bassa (LEO - Low Earth Orbit) sta cambiando il paradigma delle comunicazioni satellitari, offrendo vantaggi significativi rispetto ai satelliti geostazionari (GEO).

Questo cambio di paradigma insieme al quantum computer hanno portato diversi enti, tra cui l'Agenzia Spaziale Europea (ESA), ad affrontare nuove sfide.

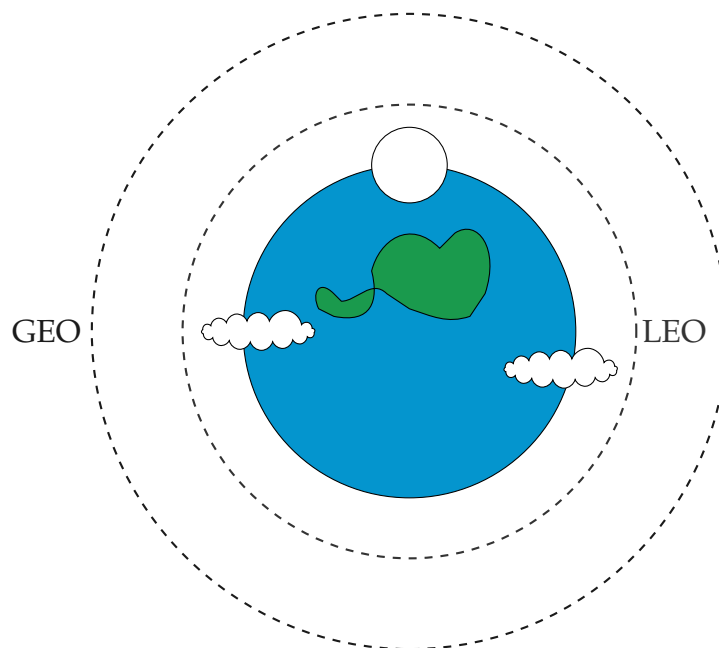


FIGURE 3.1: Orbite dei satelliti

### 3.1.1 Limitazioni

L'ambiente spaziale, caratterizzato da radiazioni intense, temperature estreme e lunghi periodi senza manutenzione, pone sfide significative in termini di progettazione e operatività dell'hardware e del software. Tra i principali vincoli per l'hardware satellitare troviamo:

- *Resistenza alle radiazioni*: i componenti elettronici devono essere progettati per resistere all'esposizione costante alle radiazioni spaziali
- *Basso consumo energetico*: l'energia disponibile per le operazioni computazionali è limitata, quindi si usano processori a basso consumo e ad alta efficienza energetica, sacrificando potenza di calcolo.
- *Elaborazione in tempo reale*: per alcune tipologie di servizi è necessario che il processamento avvenga in tempo reale.
- *Compattezza*: a causa dello spazio limitato a bordo di un satellite, i componenti hardware devono essere progettati in modo estremamente compatto.

L'hardware limitato ha un impatto diretto sullo sviluppo del software per i satelliti. Rispetto al un contesto terrestre, dove le risorse computazionali sono abbondanti, il software per i satelliti deve essere ottimizzato per funzionare su processori con bassa potenza di calcolo, limitato parallelismo e memoria ridotta. Le principali sfide per gli sviluppatori sono:

- *Semplicità e ottimizzazione*: gli algoritmi devono essere semplici e ottimizzati per funzionare su hardware con risorse limitate.
- *Parallelismo limitato*: non è possibile sfruttare un alto grado di parallelismo computazionale. Le operazioni devono essere eseguite in modo lineare o con limitato parallelismo, aumentando la complessità della progettazione.
- *Affidabilità assoluta*: il software deve essere robusto, sicuro e testato ampiamente in modo tale che possibile errori non abbiano conseguenza catastrofiche.

Particolare attenzione va posta sulle implementazioni crittografiche, dato che in questo contesto è essenziale riuscire a bilanciare sicurezza e prestazioni. Occorre ridurre al minimo l'impatto sulle risorse in modo tale che gli algoritmi di crittografia non possano compromettere l'efficienza operativa del satellite.



### 3.1.2 Stato Attuale

LEON3: Un processore open-source basato sull'architettura SPARC, progettato dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA). È utilizzato in numerose missioni satellitari europee. ESA Power Interface Standard (ECSS-E-ST-20C): Definisce le modalità con cui l'alimentazione elettrica viene distribuita all'interno dei satelliti, assicurando efficienza e affidabilità anche con limitate risorse energetiche. Per la compattezza invece: Cubesat Standard (1U, 2U, 3U, etc.): Molti satelliti moderni, soprattutto per missioni commerciali o di ricerca, seguono il formato Cubesat, che definisce dimensioni compatte modulari (10x10x10 cm per 1U) per ridurre i costi e semplificare il lancio e la costruzione dei satelliti.

Per quanto riguarda il software in particolare quello che interessa a noi è RTEMS (Real-Time Executive for Multiprocessor Systems): È un sistema operativo open-source e real-time progettato per funzionare in ambienti estremamente vincolati, come i satelliti. RTEMS è utilizzato in molte missioni spaziali per la sua capacità di gestire operazioni critiche in tempo reale. Basato su GNU/Linux

Triple Modular Redundancy (TMR): Molti sistemi critici spaziali utilizzano la ridondanza tripla modulare, eseguendo lo stesso calcolo su tre processori indipendenti e confrontando i risultati per correggere eventuali errori dovuti a radiazioni o guasti.

## 3.2 Come procediamo

Come detto con il post-quantum tutto diventa più pesante e più lento, in generale. Andiamo a caratterizzare quella che è l'impronta computazionale degli algoritmi nel caso desktop rispetto a quella di quelli classici per vederne le differenze, se queste sono molto evidenti già nel caso simulato allora non ha neanche senso andarle a considerare in un'ambiente ancora più limitato.

Considereremo nelle nostre prove quelli che sono i finalisti del processo di standardizzazione del NIST, in particolare la loro implementazione fornita da **open quantum safe** (oqs). Vedremo il loro utilizzo nell'implementazione del protocollo IKEv2, Strongswan.

## 3.3 Benchmarking

Come abbiamo effettuato il benchmarking Quindi introdurre tutta la parte di scripting e di automatizzazione tramite docker

### 3.4 Tuttavia

Notiamo che non ci sono enormi differenze in termini di tempi ma tuttavia notiamo una notevole differenza in termini della dimensione. E in contesto di questo tipo non è auspicabile

Cercando di trovare possibili soluzioni, ci siamo imbattuti su quello che è minimal IKE ovvero una versione di IKE applicabile in scenari soggetti a constraint di risorse simili a quelli presenti nello spazio.

Riguardo a questo non esistono implementazioni, per questo motivo siamo passati a provare a dare un'implementazione di quest'ultimo. In modo tale che rappresenti un punto di inizio per questo scenario.

Di questo trattiamo nel prossimo capitolo.

## Chapter 4

# Hummingbird

### 4.1 Progettazione

#### 4.1.1 Requisiti

Nella parte di progettazione portare quelli che sono i requisiti che deve rispettare l'implementazione sia funzionali che non uno tra tutto met

#### 4.1.2 Architettura

Architettura sia delle directory che a livello dei moduli Il C richiede una chiara strutturazione per gestire la complessità del codice in modo efficace

#### Moduli

Per mantenere la separazione dei compiti

#### Strutture Dati

### 4.2 Implementazione

#### 4.2.1 Strumenti

Librerie utilizzate e cose varie, tra queste quelle utilizzate sono:

- libjson: per fare il parsing del file di configurazione scritto in formato json
- libcrypto: fornisce le implementazione dei principali schemi crittografici, di hashing e gestione delle chiavi

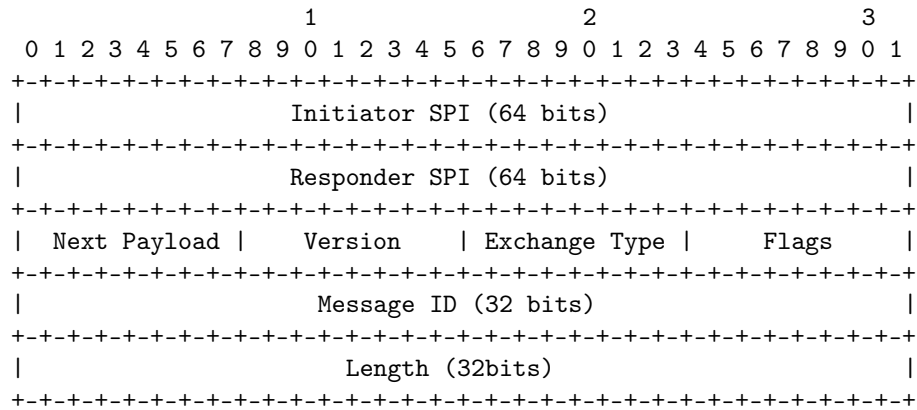


FIGURE 4.1: Formato IKE Header

## 4.2.2 Codice

Il formato dell'header IKE, presente in *Figura 4.1*, nel codice C possiamo tradurlo come una struct

```

1  #include <stdio.h>
2  int main() {
3      printf("Hello, \uWorld!\n");
4      return 0;
5  }
```

Nel parsing della risposta, è stata creata una lookup table. Giustificazione dovuta al fatto che la struttura di un pacchetto ike può essere vista come una lista semplicemente puntata quindi si presta bene ad approcci iterativi. Per questo motivo invece di andare a creare tanti buffer quanti sono i payload si è adottato un approccio diverso

a partire dal buffer del pacchetto si è creata una funzione ricorsiva il cui criterio di stop è quello del next payload nullo (fine della lista), che ad ogni iterazione si va a "mangiare un pezzo del pacchetto", nel senso che invece che riallocarlo si gioca con i puntatori una sorta di pacman ma in questo caso il buffer che non consideriamo è ancora esistente, tuttavia questa modalità evita ogni volta di andare a creare e distruggere dei buffer che sarebbe molto oneroso .

Inoltre è possibile adottare una strategia di buffering pool in cui

## 4.2.3 Sfid

## 4.3 Analisi

## Appendix A

### IKEv2 Notation

Riportare i vari approfondimenti riguardanti IKE

per esempio come vengono generate le varie chiavi e il significato delle informazioni presenti tra i messaggi

#### A.0.1 Authentication

L'autenticazione dei peer avviene effettuando il sign (o calcolando il MAC) di un payload che dipende dagli scambi precedenti. In particolare questo payload è composto da un ottetto che viene autenticato in base alla modalità di autenticazione scelta:

- Nel caso di *PubKey* questo viene firmato con la chiave privata del peer e ne viene allegato il certificato della chiave pubblica
- Nel caso di *PSK* l'AUTH payload viene generato a partire dalla chiave condivisa a cui viene aggiunto della unpredictability tramite del padding e una prf

### A.1 Key Derivation

#### A.1.1 IKE SA

Le chiavi in una IKE SA vengono derivate a partire dagli attributi dei diretti scambi. In particolare al termine del primo scambio viene calcolato il:

$$SKEYSEED = PRF(N_i | N_r, g^{ir})$$

A partire da questo seed vengono generati i parametri di sicurezza da utilizzare per la IKE SA, questi sono derivati nel seguente modo:

$$\{SK_d|SK_{ai}|SK_{ar}|SK_{ei}|SK_{er}|SK_{pi}|SK_{pr}\} = PRF + (SKEYSEED, N_i|N_r, SPI_i, SPI_r)$$

Chiave	Descrizione
$SK_d$	Utilizzata per generare il keymaterial per le CHILD_SA
$SK_a$	Chiavi per autenticare gli scambi successivi, una per direzione
$SK_e$	Chiavi per cifrare gli scambi successivi, una per direzione
$SK_p$	Chiavi utilizzata per generare l'AUTH Payload, una per direzione

TABLE A.1: Chiavi e loro utilizzo

### A.1.2 IPsec SA

Nel caso di una SA questa può essere generata automaticamente dopo l'auth oppure attraverso l'apposito scambio di questo tipo il keymaterial a partire dal quale vengono derivati i parametri di sicurezza è ottenuto nel seguente modo:

$$KEYMAT = prf + (SK_d, N_i|N_r)$$

Nel caso in cui invece si utilizza lo scambio apposito il key material è ottenuto nel seguente modo

## A.2 Security Association Payload

Il Security Association Payload denotato con SA è utilizzato per negoziare gli attributi di una Security Association. Dunque può contenere molteplici proposte, le quali devono essere ordinate per preferenza, ogni proposal contiene i seguenti algoritmi crittografici:

- Encryption Algorithm (ENCR)
- Pseudorandom Function (PRF)
- Integrity Algorithm (INTEG)
- Diffie-Hellman Group (KE)
- PQ KEM