



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INFORMATICA

Corso di Laurea in
Sicurezza dei Sistemi e delle Reti Informatiche

**Studio ed Implementazione di una
architettura avanzata basata su VPN per
Security Assessment**

RELATORE

Prof. Marco Anisetti

TESI DI LAUREA DI

Nicola Bena

Matr. 870103

CORRELATORE

Prof. Claudio A. Ardagna

Anno Accademico 2017/2018

Ringraziamenti

Voglio ringraziare in maniera sentita il prof. **Marco Anisetti** ed il dott. **Filippo Gaudenzi** per avermi seguito ed avermi sempre consigliato nella maniera migliore durante questi mesi. Un ringraziamento anche al prof. **Claudio Ardagna**, correlatore di questa tesi.

Voglio infine ringraziare le comunità open-source che gravitano intorno al kernel Linux, in particolare gli sviluppatori del framework *netfilter*, e di *OpenVPN*. Senza di loro nulla di questa tesi sarebbe stato possibile.

Nicola Bena

Indice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | MoonCloud | 13 |
| 1.1 | Overview | 13 |
| 1.1.1 | Proprietà, meccanismi, certificati | 14 |
| 1.2 | Architettura | 14 |
| 1.3 | Non solo cloud | 16 |
| 2 | VPN | 19 |
| 2.1 | Introduzione | 19 |
| 2.2 | Anatomia | 20 |
| 2.3 | Topologie | 23 |
| 2.4 | Introduzione alle tecnologie | 26 |
| 2.5 | OpenVPN | 27 |
| 2.5.1 | Overview | 27 |
| 2.5.2 | OpenVPN e MoonCloud | 28 |
| 2.5.3 | Conclusioni | 29 |
| 2.6 | SoftEther | 29 |
| 2.6.1 | Overview | 29 |
| 2.6.2 | SoftEther e MoonCloud | 35 |
| 2.6.3 | Conclusioni | 36 |
| 2.7 | IPsec | 36 |
| 2.7.1 | Overview | 36 |
| 2.7.2 | IPsec e MoonCloud | 38 |
| 2.7.3 | Conclusioni | 38 |
| 2.8 | Altre tecnologie | 39 |
| 2.8.1 | SSTP | 39 |
| 2.8.2 | OpenConnect | 39 |
| 2.8.3 | OpenSSH | 39 |
| 2.8.4 | WireGuard | 40 |
| 2.8.5 | IPsec/L2TPv3 e EtherIP/IPsec | 40 |
| 2.8.6 | PPTP | 41 |
| 2.9 | Conclusioni | 41 |
| 3 | Configurazioni di OpenVPN | 45 |
| 3.1 | SoftEther | 45 |
| 3.2 | OpenVPN | 46 |
| 3.2.1 | Introduzione | 46 |
| 3.2.2 | Configurazione base | 49 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.3 | Problematiche di configurazione | 56 |
| 3.3.1 | Impossibilità di aggiungere configurazioni alla rete target | 56 |
| 3.3.2 | La soluzione | 58 |
| 3.3.3 | Dinamicità della creazione dei client | 59 |
| 3.3.4 | Il problema | 59 |
| 3.3.5 | La soluzione | 59 |
| 3.3.6 | Dinamicità delle rotte server-side | 61 |
| 3.4 | IP mapping | 64 |
| 3.4.1 | Il problema | 64 |
| 3.4.2 | La soluzione | 65 |
| 3.5 | Recap | 70 |
| 3.6 | Configurazione finale | 72 |
| 3.6.1 | Configurazione del server | 73 |
| 3.6.2 | Configurazione del client | 75 |
| 3.7 | Testing | 77 |
| 3.7.1 | Test 1 | 77 |
| 3.7.2 | Test 2 | 78 |
| 4 | nftables | 81 |
| 4.1 | Prerequisiti | 81 |
| 4.2 | Criticità | 84 |
| 4.3 | nftables | 85 |
| 4.3.1 | Set e altre strutture dati | 87 |
| 4.4 | Come è stato usato | 91 |
| 5 | Sicurezza della VPN | 93 |
| 5.1 | Sicurezza di OpenVPN | 93 |
| 5.1.1 | Protocollo | 93 |
| 5.1.2 | Configurazioni | 94 |
| 5.1.3 | Opzioni non ancora utilizzate | 96 |
| 5.2 | Protezione di MoonCloud | 98 |
| 5.2.1 | Politica di default | 100 |
| 5.2.2 | Traffico consentito | 100 |
| 5.2.3 | Configurazione applicata | 101 |
| 5.2.4 | Protezione con nftables | 102 |
| 5.3 | Scenari di attacco | 104 |
| 5.3.1 | Scenario 1 | 105 |
| 5.3.2 | Scenario 2 | 105 |
| 5.3.3 | Scenario 3 | 106 |
| 5.3.4 | Scenario 4 | 106 |
| 5.3.5 | Scenario 5 | 107 |
| 6 | MoonCloud_VPN | 109 |
| 6.1 | Requisiti | 109 |
| 6.2 | Architettura | 110 |
| 6.3 | Dettagli | 112 |
| 6.3.1 | Certificate Management | 112 |
| 6.3.2 | IP Mapping | 117 |

| | |
|--------------------------------------|------------|
| <i>INDICE</i> | 7 |
| 6.3.3 Trasferimento file | 122 |
| 6.3.4 Registrazione server | 129 |
| 6.3.5 Registrazione client | 131 |
| 6.4 API | 135 |
| Bibliografia | 143 |

Elenco delle figure

| | | |
|------|--|-----|
| 1.1 | L'architettura di MoonCloud | 15 |
| 1.2 | L'architettura di MoonCloud estesa con VPN | 18 |
| 2.1 | Tunnelling | 21 |
| 2.2 | Configurazione <i>Local Server</i> | 24 |
| 2.3 | Configurazione <i>RSMC – Remote Server Multi Client</i> | 25 |
| 2.4 | Configurazione <i>RSSC – Remote Server Single Client</i> | 25 |
| 2.5 | Il multiplexing di OpenVPN | 27 |
| 2.6 | Il design di SoftEther | 31 |
| 2.7 | Configurazione di SoftEther per Remote Access VPN | 31 |
| 2.8 | Configurazione LAN-to-LAN con SoftEther al layer 2 | 32 |
| 2.9 | Configurazione LAN-to-LAN con SoftEther al layer 3 | 33 |
| 2.10 | La topologia realizzata con <i>SecureNAT</i> | 34 |
| 2.11 | Comparazione performance delle diverse tecnologie VPN | 35 |
| 2.12 | Benchmark tra IPsec, OpenVPN e WireGuard | 41 |
| 3.1 | Struttura di un pacchetto OpenVPN | 47 |
| 3.2 | IP Mapping: MoonCloud → Target | 70 |
| 3.3 | IP Mapping: Target → MoonCloud | 71 |
| 3.4 | Test 1 per OpenVPN | 79 |
| 3.5 | Il risultato dell'esecuzione del test | 80 |
| 3.6 | Test 2 per OpenVPN | 80 |
| 4.1 | Hook di netfiler | 82 |
| 4.2 | Hook INGRESS | 82 |
| 6.1 | Il deployment di <code>MoonCloud_VPN</code> | 110 |
| 6.2 | Diagramma di interazione: assegnamento reti | 122 |
| 6.3 | Diagramma di attività: trasferimento file | 128 |

Introduzione

Il successo del cloud computing ha imposto un grande cambiamento nell'ambiente dell'IT, portando indubbi benefici sotto numerosi punti di vista, anche economici. Dall'altro lato si pongono problemi di sicurezza derivanti proprio da questo outsourcing, per i quali sono richiesti nuovi approcci. Tra questi, uno molto efficace è quello basato sulla raccolta continua di evidenze presso il sistema cloud, al fine di valutare tramite esse quale sia l'effettivo stato della sicurezza.

MoonCloud è un prodotto per *Security Assessment* e *Security Assurance* basato su tale approccio, i cui target sono proprio i sistemi cloud. L'obiettivo di questa tesi è stato estendere MoonCloud per permettere di effettuare attività di analisi di sicurezza anche verso sistemi IT tradizionali e cloud private. Poiché tali sistemi sono confinati entro un firewall e non accessibili dall'esterno, vi è stata la necessità di disporre di hook *dall'interno* di queste reti target. In particolare, si è studiato come collegare la rete MoonCloud ai sistemi dei clienti mediante una VPN.

Questo collegamento deve essere il più possibile trasparente per i clienti, nei limiti del possibile non si vuole effettuare alcun tipo di configurazione presso essi; inoltre, deve esserci un alto grado di automatizzazione nella gestione della VPN. Questo ha posto di fronte a sfide che in una tradizionale VPN non si hanno, ed ha portato a diverse soluzioni innovative, tra cui l'*IP mapping* ed il *NAT al contrario*.

L'elaborato è organizzato come segue:

Capitolo 1 – MoonCloud In questo capitolo si presenta MoonCloud, se ne descrive il funzionamento e l'architettura, unitamente alle motivazioni che hanno portato all'utilizzo di una VPN.

Capitolo 2 – VPN Il secondo capitolo fornisce una panoramica sulle principali tecnologie VPN disponibili. Per ciascuna si analizzano i pro ed i contro, unitamente alle possibili integrazioni con MoonCloud.

Capitolo 3 – OpenVPN *OpenVPN* è la tecnologia scelta: nella prima parte del capitolo la si descrive, mentre nella seconda si dettagliano i problemi che sono stati incontrati unitamente alle loro soluzioni. Di particolare rilevanza vi è l'*IP mapping* per gestire potenziali conflitti degli indirizzi IP.

Capitolo 4 – nftables *nftables* è il successore di *iptables*, e come tale porta numerose miglitorie. Questo capitolo analizza prima *iptables*, identificandone le principali criticità, per mostrare infine *nftables* e come si integri nella soluzione proposta.

Capitolo 5 – Sicurezza della VPN Il collegamento VPN *espone* parte della rete di MoonCloud che normalmente non sarebbe accessibile, per questo sono state

adotatte una serie di contromisure volte alla sua protezione: sono descritte in questo capitolo.

Capitolo 6 – MoonCloud_VPN *MoonCloud_VPN* è il nome del microservizio che è stato realizzato come contorno della soluzione VPN, e si occupa della sua gestione. I suoi requisiti, la sua architettura, il suo funzionamento sono dettagliati nel sesto capitolo.

Capitolo 1

MoonCloud

Questo primo capitolo descrive il funzionamento di MoonCloud, unitamente alle motivazioni per cui la soluzione proposta basata su VPN era necessaria.

1.1 Overview

MoonCloud è un framework per la valutazione ed il monitoraggio continuo di servizi cloud. Il suo funzionamento consiste nella definizione di proprietà (es: *cifratura dei dati salvati su storage*) e nella verifica in maniera continua che tali proprietà siano sempre rispettate. Il rispetto di queste proprietà porta al rilascio di un certificato che attesta ciò. Nel momento in cui tale rispetto viene meno il certificato diventa revocato, e, si presume che vengano al più presto applicate azioni correttive per ripristinare la proprietà.

Il framework prevede il coinvolgimento di diversi soggetti:

- *CA – Certification Authority* responsabile del rilascio dei certificato
- *accredited lab* che si occupa dell'analisi e della verifica delle proprietà (può essere il framework MoonCloud stesso)
- *service provider* ovvero lo sviluppatore di di applicazioni basate sulla cloud
- *cloud provider*, il fornitore della piattaforma/infrastruttura cloud. Può essere esso stesso a volersi certificare, oppure semplicemente supportare le applicazioni del *service provider*.

Si definisce il concetto di *ToC – Target of Certification* come il contesto di applicazione ed il perimetro della cloud entro il quale si vuole effettuare una valutazione. Il processo di certificazione si svolge in due fasi. Nella prima fase avviene la verifica del rispetto della proprietà in un ambiente di laboratorio controllato (*pre-deployment evaluation*), allo scopo di collezionare evidenze. Nel caso in cui le evidenze diano esito positivo, la CA rilascia un certificato per il ToC.

Nella seconda fase, detta *production evaluation*, l'*accredited lab*, mediante continue raccolte di evidenze, verifica che il certificato sia o meno sempre valido.

1.1.1 Proprietà, meccanismi, certificati

Fondamentale è la separazione tra *proprietà* e *meccanismi*.

Una *proprietà non funzionale* è definita come “una proprietà astratta presa da vocabolari comuni o domain-specific, ed un set di attributi che la raffinano” [1].

Un *meccanismo non funzionale* viene definito come “un tipo di meccanismo (es: cifratura) ed un set di attributi che specificano la configurazione del meccanismo (es: lunghezza chiave), unitamente a configurazioni cloud-specific che interessano il comportamento del meccanismo” [1].

Questi due concetti si riflettono su due *modelli* necessari per l’attività di certificazione.

CM Template – Certificate Model Template \mathcal{T} E’ un modello dichiarativo che descrive ad alto livello che cosa deve essere fatto per verificare delle proprietà. Viene definito dalla CA.

CM Instance – Certificate Model Instance \mathcal{I} Si tratta di un modello eseguibile generato istanziando un \mathcal{T} su un vero ToC.

Il certificato viene rilasciato quando le attività indicate da \mathcal{I} danno un riscontro positivo, esso contiene una descrizione della proprietà certificata, un riferimento alle evidenze collezionate, ed è legato al ToC.

Affinché le evidenze raccolte ed i risultati derivati da esse siano conformi alla realtà è fondamentale che tutti i modelli usati siano conformi a quelli reali. Ad esempio, i modelli di evidenze che ci si aspetta siano corretti devono corrispondere alle evidenze che davvero ne provino la correttezza. Lo stesso vale per l’intera modellazione del sistema [2].

Recentemente ([2]) MoonCloud ha introdotto anche verifiche di vincoli basati sul tempo (es: garantire che un tempo di risposta di una API inferiore ad x ms), sulla probabilità che certi eventi si verifichino, su particolari configurazioni che devono essere adottate all’interno di un modello più ampio, ed anche alla verifica di attacchi noti.

1.2 Architettura

Logicamente, è possibile dividere l’architettura MoonCloud in due macrocomponenti, così come mostrato in figura 1.1. La comunicazione tra di essi avviene mediante due code:

Agent Queue Su di essa vengono inviate richieste di esecuzione di test.

Evidence Queue E’ responsabile del passaggio delle evidenze tra il componente di esecuzione e quello di gestione.

I due macrocomponenti sono:

Certification Manager Si occupa dell’orchestrazione dell’intero processo di certificazione. Ne fanno parte i seguenti moduli:

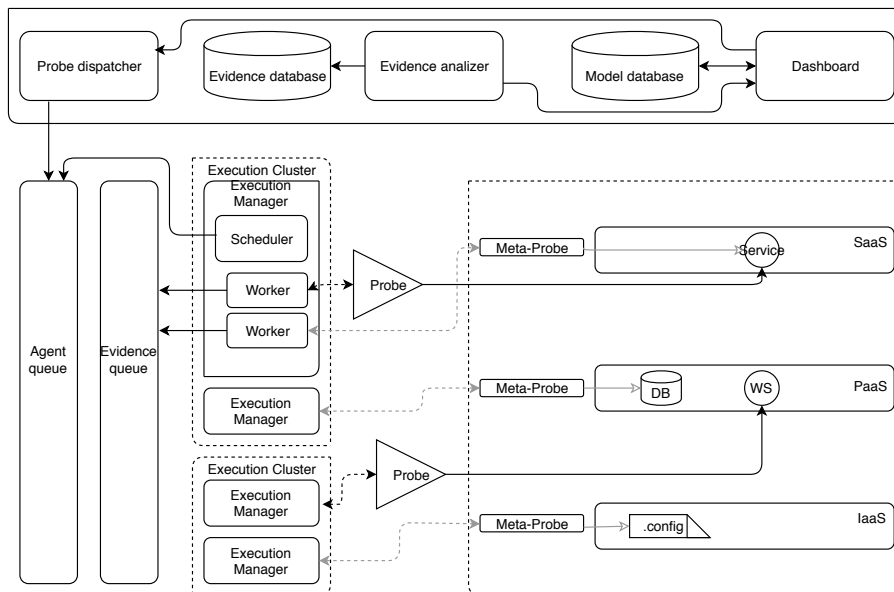


Figura 1.1: L'architettura di MoonCloud

- **Dashboard:** una web GUI utilizzata dai clienti per gestire l'intero processo di certificazione
- **Model Database:** una base di dati in cui sono memorizzate tutte le regole relative al processo di certificazione (e di verifica dei modelli)
- **Probe Dispatcher** il quale si occupa della comunicazione tra Certification Manager ed i cluster di esecuzione.
- **Result Database** ovvero una base di dati InfluxDB in cui vengono salvate le evidenze collezionate durante i test¹
- **Evidence Analyzer** è un componente responsabile di analizzare le evidenze raccolte nella specifica base di dati.

Execution Cluster Un set di VM dedicate all'esecuzione dei test così come orchestrato dal Certification Manager. In ciascun cluster vi sono uno o più Execution Manager, responsabili della gestione degli agent per l'analisi. Ognuno di questi Manager è composto da:

- **Scheduler:** aspetta richieste dal Certification Manager e ne fa il dispatching al successivo componente.
- **Worker:** esso è connesso direttamente agli agenti che analizzano, manda ad essi le configurazioni necessarie, ne raccoglie le evidenze e le invia al Certification Manager.

Gli agent di esecuzione a loro volta si dividono in due categorie:

Probe Sono responsabili dell'esecuzione dei test e del monitoraggio in un certo ToC.

¹<https://www.influxdata.com/>

Meta-probe Si occupano di verificare eventuali violazioni ai vincoli di tempo, probabilità, configurazioni.

Si può dire che mentre il primo tipo di *probe* sia *invasivo*, il secondo invece ha un minore overhead in quanto si limita a verificare una certa proprietà senza interferire con il normale funzionamento del sistema. Poiché prevedono una forma di analisi meno intrusiva, il minor overhead comporta anche una minore qualità delle evidenze raccolte. Ad esempio, un *probe* potrebbe utilizzare `nmap` per verificare che una certa comunicazione sia cifrata con TLS, mentre un *meta-probe* si potrebbe limitare a leggere un file di configurazione alla ricerca dell'opzione che abilita la cifratura TLS.

Entrambi sono eseguiti come dei container `Docker` su delle *Docker machine* (ci si riferirà ad esse anche come *Docker host*), e si dispone anche di un repository interno di ricette per essi². L'attività di test è eseguita da script Python all'interno di questi container. L'utilizzo di `Docker` ha un grande vantaggio: mediante i `Dockerfile` si possono specificare tutte le dipendenze necessarie ad un certo test, le quali saranno installate automaticamente in fase di creazione dell'immagine. Non è quindi necessario preoccuparsi di avere una piattaforma di esecuzione sui cui siano disponibili *tutte* le dipendenze che servono.

D'ora in poi ci si riferirà al termine “rete MoonCloud” come a quella delle costituita dalle *Docker machine* e dal relativo `Execution Cluster`.

1.3 Non solo cloud

MoonCloud è stata progettata per poter essere eseguita sulla cloud, e più di tutto, la si vuole *as-a-service*, ciò significa che i clienti che vogliono certificare parte della propria infrastruttura cloud, non devono installare alcun software, semplicemente usano la `Dashboard` per regolare i controlli che vogliono fare.

La verifica del fatto che, ad esempio, si utilizzi uno storage cifrato, può essere effettuata mediante hook messi a disposizione dal cloud provider.

Tuttavia, si è voluto ampliare la platea di possibili target per MoonCloud: si supponga che anziché voler analizzare la configurazione di OpenStack di un deployment pubblico si vogliano verificare certe policy di `Active Directory` all'interno di una rete aziendale³. Anziché utilizzare gli hook messi a disposizione da un cloud provider, occorrerebbe utilizzare le API di `Active Directory`, e come veicolo di accesso ad esse non più (ad esempio) HTTP, ma bisognerebbe aver accesso alla rete interna in cui `Windows Server` è in esecuzione. Infatti, l'obiettivo di MoonCloud per espandere i propri clienti è quello di non solo essere in grado di analizzare dei target nelle cloud pubbliche, ma anche in sistemi IT tradizionali o cloud private. Ciò pone un grande problema: l'accesso alla rete fisica, infatti non si potrebbero più utilizzare gli hook forniti dal cloud provider.

A maggior ragione, il problema si fa più complesso se si vogliono verificare proprietà relative a servizi *solo interni* di una rete, che non sono esposti all'esterno.

²<https://www.docker.com/>

³<https://docs.microsoft.com/en-us/windows-server/identity/ad-ds/get-started/virtual-dc/active-directory-domain-services-overview>

Occorre quindi cambiare metodo di accesso, in particolare occorre avere accesso *dall'interno*, visto che tali reti (definite *reti target*) sono ragionevolmente e auspicabilmente protette da un firewall.

Nella fattispecie, si è investigato l'utilizzo di una soluzione basata su VPN, per la quale si porta fisicamente nella rete target un VPN client (*VPN appliance*), responsabile di connettersi alla rete MoonCloud e di fornire un canale di comunicazione altamente sicuro. Le Docker machine restano deployate nella cloud in cui MoonCloud stessa è, e le loro richieste di analisi passano tramite la VPN.

Sono stati definiti i seguenti requisiti:

- soluzione altamente sicura
- se possibile, basata su TLS/HTTPS. Questo perché si ritiene che almeno il traffico HTTP ed HTTPS sia consentito anche dai firewall più stringenti. Una VPN basata su TLS quindi è ragionevolmente consentita senza necessità di riconfigurare il firewall aziendale. Questo si è anche tradotto in una preferenza di TCP rispetto ad UDP.
- Preferire VPN configurabili e flessibili rispetto a VPN performanti ma poco adattabili ai requisiti.
- La soluzione VPN deve essere il più possibile lightweight per la rete target, ovvero deve poter, nei limiti del possibile, funzionare senza dover configurare nulla nella rete target (ad eccezione del VPN client stesso).

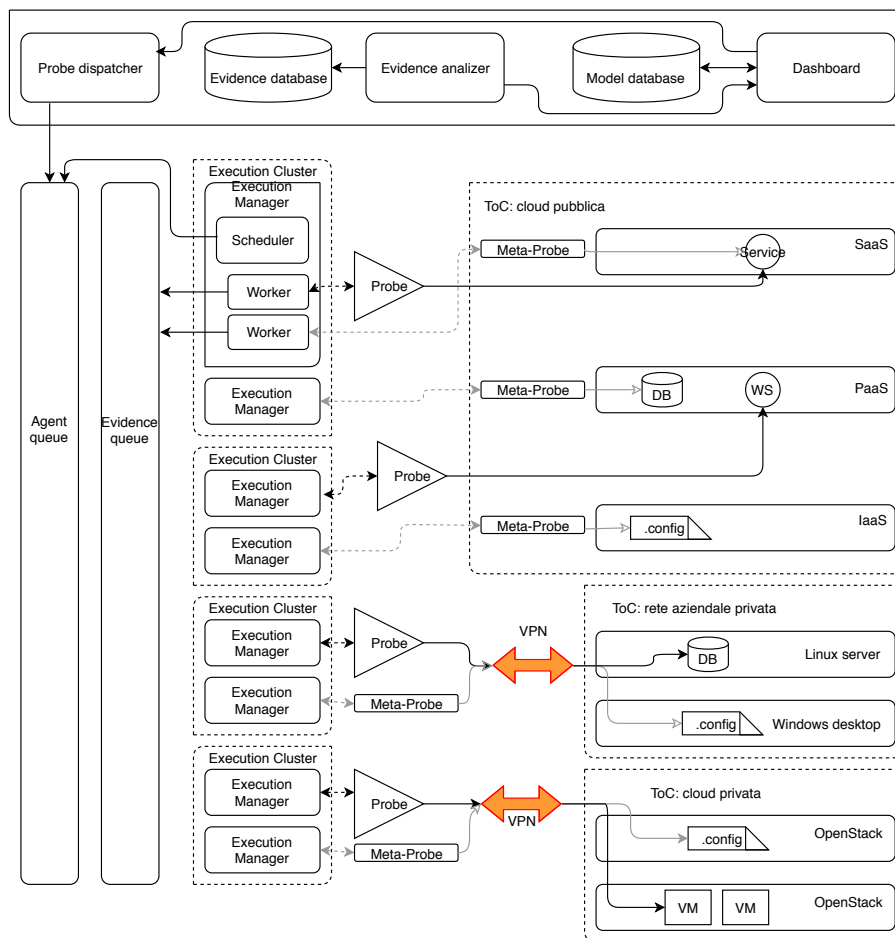


Figura 1.2: L'architettura con l'utilizzo di una VPN per consentire l'analisi di sistemi IT tradizionali

Capitolo 2

VPN

Questo capitolo rappresenta la versione modificata dello studio fatto come primo passo dell'attività di questa tesi, in cui si è fatta una ricerca sulle principali tecnologie di VPN esistenti, allo scopo di individuare quali potessero soddisfare i requisiti di MoonCloud.

2.1 Introduzione

VPN è l'acronimo di *Virtual Private Network*, ed indica diverse tecnologie e protocolli utilizzati per connettere tra loro reti locali, singoli host ad una rete, singoli host tra loro. In ogni caso i componenti della VPN si trovano fisicamente in sedi diverse. Questa *connessione* avviene a diversi livelli dello stack ISO/OSI, principalmente al livello 2 od al livello 3.

Si possono realizzare diverse topologie:

Remote Access Si realizza questa configurazione quando si vuole un connettere uno o più host ad una rete. Un esempio classico è quello di dipendenti che connettono il proprio dispositivo (PC, tablet, smartphone, ecc...) alla rete aziendale quando non si trovano in sede, potendo così accedere alle risorse che normalmente avrebbero disponibili solo se si trovassero fisicamente nella sede dell'azienda.

LAN-to-LAN A volte ci si riferisce a questa topologia anche come *Intranet VPN*. In questo caso si utilizza una VPN per connettere tra di loro due o più reti che sono geograficamente dislocate in posti diversi. E' molto utile per aziende che hanno più sedi sul territorio (anche in diversi stati), e che desiderano connettere tra di loro le reti di ciascuna sede.

Extranet VPN Si tratta di un caso speciale di *Intranet VPN*, e si realizza quando quando l'accesso ad una certa rete viene ristretto, ovvero è possibile accedere solo ad alcune sue parti mediante VPN.

Ma cosa significa davvero *connettere tra di loro più reti*? La domanda sorge spontanea, poiché una volta che due reti sono in Internet, in qualche modo esse sono (indirettamente) connesse tra loro. In Internet, una normale rete privata raggiunge solo le risorse che altre reti hanno rese disponibili su Internet, siano esse dei

server web o dei server mail. Semplificando, si potrebbe dire che le varie reti accedono alle varie risorse delle altre *a livello di protocolli applicativi*.

Nel caso delle VPN, *connettere tra di loro più reti a diversi livelli dello stack ISO/OSI (o TCP/IP)* significa realizzare un collegamento *ad un livello più basso di quello applicativo*. La maggior parte delle VPN realizza un collegamento al livello 2 od al 3, e questo ha i seguenti effetti pratici sulle n reti connesse tra di loro in VPN:

- livello 2: le reti si trovano all'interno di un unico spazio di indirizzi IP (con stesso indirizzo di rete), ed è *come se fossero separate da uno switch*.
- Livello 3: le diverse reti sono ciascuna in uno spazio di indirizzi separato, ed è *come se fossero separate da un router*.

Un collegamento in VPN tra due reti al livello 2 o 3 consente a ciascun host di ogni rete di accedere a *tutte* (o quasi) le risorse dell'altra.

Si distinguono tre tipologie di VPN:

Secure VPN Una VPN realizzata utilizzando crittografia dei dati in transito tra i diversi host/reti coinvolti, *secure* poiché l'utilizzo di algoritmi crittografici (ammesso che siano utilizzati correttamente) garantisce che nessun attaccante che intercetti tale traffico sia in grado di decifrarlo o alterarlo in qualsiasi modo.

Trusted VPN Sono fornite dagli ISP, i quali garantiscono che nessun'altro cliente sia sullo stesso circuito VPN, *trusted* poiché ci si fida di questa garanzia, inoltre, non vengono fornite particolari proprietà di sicurezza mediante protocolli crittografici.

Hybrid VPN Termine che indica una VPN composta da tratti *Secure* e da tratti *Trusted*.

Di seguito, ci si concentrerà esclusivamente sulla prima tipologia, poiché essa è quella di interesse per MoonCloud.

2.2 Anatomia

Nell'ambito delle VPN del primo tipo, un principio base su cui si fonda il loro funzionamento è quello dell'*incapsulamento*. Si tratta di un termine ben noto nell'ambito dei protocolli di rete, che può essere sintetizzato come di seguito. Siano A, B due protocolli di rete, non ha importanza che B sia ad un livello più basso rispetto ad A . Entrambi i protocolli hanno un *header* ed un *payload*. Si dice che B *incapsula* A quando il payload di B è costituito dall'intero pacchetto di A (cioè header e payload di A), come mostrato in figura 2.1. Nello stack di protocolli di rete, sia essa ISO/OSI o TCP/IP, l'incapsulamento è il modo di procedere normale, per cui ad esempio un pacchetto IP incapsula TCP, che a sua volta incapsula HTTP.

Si definisce *protocollo VPN* il protocollo utilizzato nel collegamento tra le reti/host. Generalmente si distingue tra VPN client e VPN server, sebbene una



Figura 2.1: Tunnelling

volta stabilito il collegamento il protocollo VPN sia spesso peer-to-peer (nel senso che lo scambio di dati è bidirezionale); in ogni caso vi è sempre un host che inizia la connessione.

Il VPN server tipicamente gestisce più client contemporaneamente, i quali in quanto tali iniziano la connessione verso il server. A seconda della topologia/tecnologia, i client possono essere responsabili di connettere alla rete del server la rete a cui essi appartengono; viceversa, il server *può* rendere visibile ai client la rete cui appartiene. Altrettanto opzionalmente, il server può connettere tra di loro i diversi client e le loro reti (nel senso che i client possono comunicare tra loro anziché solo con il server/con la rete del server).

Per poter effettivamente collegare tra loro più *reti*, il VPN *peer* deve avere i seguenti *punti di contatto*:

- collegamento con l'altro peer, raggiungibile tramite la rete Internet;
- punto di ricezione da cui riceve pacchetti provenienti dagli host della rete in cui esso si trova e diretti alla rete dell'altro peer;
- punto di invio al quale l'host invia i pacchetti provenienti dalla rete dietro la VPN e diretti ad host della propria.

Il collegamento di cui al primo punto si realizza spesso (ma non sempre) con un socket, mentre gli ultimi due punti si realizzano con una *scheda di rete virtuale*.

Nel collegamento lungo il socket, la tecnologia VPN definisce il *protocollo VPN* da utilizzare, può essere un protocollo già esistente come TLS, oppure uno sviluppato ad hoc.

Una scheda di rete virtuale (o virtual NIC – Network Interface Card) è una scheda di rete che esiste nel kernel del sistema operativo ma che non ha un corrispettivo fisico. Se ne può creare una al livello 2 od al livello 3 (utilizzando TUN, modulo del kernel implementato in diversi sistemi operativi). Una scheda di rete virtuale è associata ad un software che compie operazioni su essa, e, come per ogni scheda di rete, tali operazioni sono quelle di invio e ricezione.

Inviare Il software associato invia un pacchetto alla NIC, l'effetto è che tale pacchetto viene *ricevuto* dal kernel del sistema operativo e processato come un qualsiasi altro pacchetto, pertanto l'OS deciderà dove e come inviarlo, e se applicare ulteriori trasformazioni.

Ricevere Il sistema operativo riceve un pacchetto che ha per indirizzo destinazione quello della scheda di rete virtuale, l'OS quindi inoltra il pacchetto alla NIC virtuale in questione, l'effetto è che il software associato riceve i dati che il sistema operativo ha inoltrato. Il pacchetto che viene inoltrato alla NIC può essere arrivare da un altro host od essere stato generato localmente.

A livello di processo associato alla NIC, *inviare un dato alla NIC* significa chiamare la funzione `write()`, mentre *ricevere* significa utilizzare `read()` (o funzioni equivalenti).

L'idea di base è che ciò che il software VPN legge dalla scheda di rete virtuale è ciò che è destinato ad un altro membro della VPN, e quindi venga incapsulato secondo il protocollo VPN usato. Allo stesso modo, ciò che si riceve dal socket è destinato alla proprio rete (salvo il caso di un server che connette più client), pertanto viene scritto sulla NIC, per essere dato in gestione al proprio sistema operativo in modo che possa inoltrarlo al destinatario.

Due note fondamentali che occorre sempre tenere presenti:

- se si realizza una VPN al livello 3, tutte le reti partecipanti devono avere degli spazi di indirizzi diversi. Il protocollo incapsulato è IP (versione 4 o 6).
- In una VPN al livello 2, tutte le reti partecipanti devono stare nella stessa rete IP. Si incapsula il protocollo Ethernet.

Anche le schede di rete virtuali sono dotate di un indirizzo IP e subnet mask. Si definisce come *subnet VPN* lo spazio di indirizzi dedicato alle NIC che partecipano ad una stessa VPN. E' preferibile che tutte le NIC che compongono una VPN abbiano lo stesso NET ID. A seconda delle tecnologie, il VPN server può incorporare anche funzionalità di un DHCP server ed assegnare indirizzi IP alle schede virtuali dei client.

Per capire meglio quanto spiegato, si procede con un esempio. Si supponga ora di voler configurare una certa VPN X , e che si voglia realizzare una topologia LAN-to-LAN tra due reti A, B , in cui nella prima si trova il server VPN X , nella seconda si trova il client. Lo scenario è il seguente:

- rete A : indirizzo di rete: $192.168.1.0/24$
- rete B : indirizzo di rete: $192.168.10.0/24$
- indirizzo interno del server VPN s in A : $192.168.1.200$
- indirizzo pubblico del server VPN: $2.7.200.70$
- indirizzo interno del client VPN c in B : $192.168.10.20$

Si definiscono infine gli host $192.168.1.5$ come a_5 , e $192.168.10.5$ come b_5 , infine si suppone che gli indirizzi IP dei default gateway delle due reti finiscano in $.254$.

Per il momento non ci si concentra troppo sulla configurazione delle rotte, supponendo che i pacchetti arrivino agli host corretti. Si anticipa soltanto che in tutte le reti partecipanti alla VPN (in questo caso A e B), occorre configurare *almeno una rotta*; nel capitolo in cui si descrivono le configurazioni di OpenVPN, questo aspetto viene affrontato nel dettaglio.

Si vede quindi cosa succede quando b_5 vuole comunicare con a_5 , posto che il collegamento VPN tra c ed s sia già stato stabilito con successo. Si precisa che si utilizza il termine generico *pacchetto* per indicare un qualsiasi messaggio di un qualsiasi protocollo di rete.

- Il pacchetto da b_5 viene inviato, e quindi ricevuto da c .
- Il sistema operativo di c invia il pacchetto alla scheda di rete virtuale della VPN.
- Il pacchetto originale viene incapsulato da c in un nuovo pacchetto secondo il protocollo VPN, quindi inviato ad s e da s ricevuto.
- s decifra (ed effettua verifiche di autenticità, integrità, ecc. . .) il pacchetto, a questo punto il risultato della decifratura è un pacchetto esattamente uguale a quello generato al punto 1.
- s scrive il pacchetto sulla propria scheda di rete virtuale.
- L'OS di s riceve il pacchetto, lo invia a a_5 .

Il protocollo di trasporto che viene in genere preferito è UDP in quanto introduce meno overhead rispetto a TCP. A causa dei particolari requisiti di MoonCloud, ci si è concentrati invece su soluzioni che supportassero quest'ultimo, poiché è possibile che nelle reti target UDP sia bloccato, mentre è infattibile ritenere che TCP stesso sia bloccato (quanto meno si ritiene che almeno il traffico HTTP sia consentito). Probabilmente vi saranno delle restrizioni, e nel caso in cui la VPN non riesca a funzionare si può sempre chiedere di aprire una porta sul firewall, l'importante è limitare il più possibile questi casi.

2.3 Topologie

In questa sezione si esaminano le diverse topologie realizzabili per connettere una rete target a MoonCloud. Non tutte le tecnologie VPN consentono di realizzare le topologie qui dettagliate.

LS - Local Server In questa configurazione si prevede di installare i VPN server in MoonCloud, mentre nelle reti target si porta il device VPN client, il quale è incaricato di connettersi al VPN server. Un server può essere potenzialmente responsabile per più reti client diverse, anzi questo è ciò che si vorrebbe. I container che fanno analisi (o l'host su cui sono in esecuzione) sono configurati per inoltrare i pacchetti al VPN server, il quale li invia alla rete target mediante il collegamento VPN.

RSMC - Remote Server Multi Client Opposta alla precedente, in RSMC si installa un VPN server in ogni rete target. In una configurazione di tipo *Multi Client*, ciascun *Docker host* è connesso direttamente in VPN con il server, il quale, una volta ricevuti i pacchetti dalla VPN li invia agli host target.

RSSC - Remote Server Single Client Simile ad RSMC, il VPN server è presente nella rete target, in MoonCloud si realizza, per ciascuna rete target, un unico VPN client, a cui i Docker host responsabili per una certa rete target inviano i pacchetti. Quest'unico VPN client fungerebbe quindi da gateway per i target. Il client invia i pacchetti lungo la VPN al server, che provvede ad inoltrarli agli host nella rete target.

Nelle configurazioni di tipo *Remote Server*, è necessario che il server sia direttamente raggiungibile da MoonCloud, e quindi deve disporre di un indirizzo IP pubblico. Si è supposto ragionevolmente che la rete target disponga di un collegamento ad Internet, e che sia dietro router/firewall che esegua NAT. Poiché vi è NAT, è fondamentale che il server disponga di un qualche meccanismo di NAT Traversal, poiché si vuole evitare di dover configurare port forwarding sul router del cliente.

Vi sono naturalmente casi in cui non c'è NAT, ma sono una minoranza.

In configurazioni *Local Server* il problema non si pone perché la comunicazione viene *iniziata* dall'interno della rete target.



Figura 2.2: Configurazione *Local Server*. Le frecce più spesse mostrano il traffico che transita sulla VPN (di due colori diversi per identificare le due reti), mentre quelle *thin* indicano del traffico non encapsulato.

Già in questa fase iniziale di studio si era previsto l'utilizzo del *NAT al contrario*, un termine coniato qui per indicare un particolare utilizzo del NAT. Si supponga di realizzare una VPN tra due reti A e B , e che nella rete B non si possano modificare rotte. Si definisce VPN_A il dispositivo VPN nella rete A (non importa se sia client e server), ed allo stesso modo si definisce la sua controparte VPN_B . I pacchetti ricevuti da VPN_B provenienti da VPN_A hanno come indirizzo IP uno appartenente ad A , e sono immessi in B senza modifiche. Le risposte a tali pacchetti dovrebbero essere inoltrate a VPN_B , ma poiché non si è configurata nessuna rotta perché non è stato possibile, saranno invece inoltrate al default gateway di B .

Il *NAT al contrario* consiste nell'applicare la traduzione degli indirizzi su VPN_B ai pacchetti che provengono dalla VPN, in modo da immetterli in B con l'indirizzo IP sorgente uguale a quello di VPN_B . Le risposte a tali pacchetti modificati



Figura 2.3: Configurazione *RSMC* – *Remote Server Multi Client*. Ciascun *Docker host* è anche un VPN client. La spunta verde sui firewall nelle reti target indica che deve essere consentito l'accesso dall'esterno verso i VPN server.

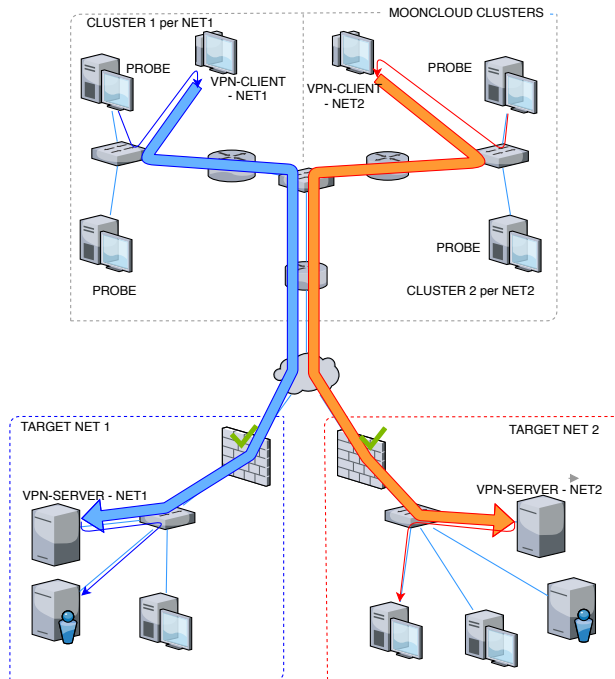


Figura 2.4: Configurazione *RSSC* – *Remote Server Single Client*. Per ogni cluster dedicato ad una certa rete target vi è una host che svolge il ruolo di VPN client. E' ancora richiesto che i firewall consentano il traffico.

giungono senza problemi a VPN_B , perché hanno come destinazione un IP della stessa rete, per cui non si contatta il default gateway. Questo meccanismo è stato

| Tecnologia | Protocollo di trasporto | Protocollo incapsulato | Passa fw. stringenti |
|---------------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------|
| OpenVPN | TLS over TCP/UDP | Ethernet/IP | No |
| IPsec (IKEv2) | IPsec | IP | No |
| SoftEther | HTTPS (anche ICMP, DNS) | Ethernet/IP | Sì |
| L2TP/IPsec (IKEv1) | IPsec | IP | No |
| SSTP | HTTPS | PPP (IP) | Sì |
| OpenConnect (Cisco Any Connect) | DTLS e HTTPS | IP | Sì con HTTPS |
| OpenSSH | SSH | Ethernet/IP/TCP | No |
| WireGuard | WireGuard (UDP) | IP | No |
| L2TPv3/IPsec | IPsec | Ethernet (e altri layer 2) | No |
| EtherIP/IPsec | IPsec | Ethernet | No |
| PPTP | GRE | PPP (IP and others) | No |

Tabella 2.1: Tecnologie per VPN. Con “Protocollo di trasporto” si intende quale è il protocollo di più alto livello in cui si incapsulano i pacchetti indicati dalla colonna “Protocollo incapsulato”. Per “fw stringenti” si intendono firewall in grado di fare filtraggio al livello applicativo.

descritto in maniere molto sintetica, e poiché è una soluzione che è stata davvero applicata, viene analizzato molto più nel dettaglio nel capitolo dedicato alle configurazioni di OpenVPN.

Tra queste topologie, si anticipa che quella scelta è *LS*.

2.4 Introduzione alle tecnologie

Questa sezione è demandata all’analisi delle principali tecnologie VPN. Per ciascuna si elencano i principali passi da compiere per configurare una VPN, unitamente ad una valutazione della migliore topologia, tenendo sempre presente che si vuole limitare il più possibile il numero di configurazioni da effettuare nella rete target.

Una nota prima di proseguire: durante le successive pagine di questo documento si utilizzerà il termine *pacchetto* per indicare una generica sequenza di byte di un generico protocollo, presente in un certo momento in un host dopo essere stata ricevuta o prima di essere inviata, oppure in viaggio sulla rete. Sono perfettamente consapevole che per ogni livello dello stack ISO/OSI vi sia un termine specifico per indicare tale sequenza, ad esempio *frame* per il livello 2 con Ethernet, oppure *datagrammi* per il protocollo UDP, e così via. Tuttavia, come si è visto dalla tabella 2.1, le VPN possono funzionare su diversi protocolli di trasporto (non solo

al livello 4), e possono altresì incapsulare pacchetti di livelli diversi. Per questa ragione si è scelto di utilizzare sempre il termine *pacchetto* per riferirsi ad essi.

Tra le soluzioni indicate di seguito, la prima scelta è stata SoftEther. Per motivi che verranno spiegati in seguito, la soluzione definitiva è **OpenVPN**.

2.5 OpenVPN

2.5.1 Overview

OpenVPN [21] è un software open source molto diffuso per la creazione di VPN, è in grado di incapsulare pacchetti al livello 2 o 3, e come protocollo di trasporto può usare TCP o UDP. E' la soluzione che è stata scelta, ed in questo capitolo se ne presenta una panoramica, mentre viene approfondita nel dettaglio nel prossimo.

Per ciascun tunnel VPN, vengono create due collegamenti:

- Control Channel cifrato con TLS per scambiarsi informazioni di servizio
- Data Channel cifrato con un protocollo simile a TLS per lo scambio di dati.

Entrambe i collegamenti sono multiplexati su di un'unica connessione da OpenVPN, sia essa TCP o UDP[22].

La figura 2.5 mostra un semplice schema del suo funzionamento.

OpenVPN viene distribuito anche in una versione *enterprise* a pagamento: si



Figura 2.5: Il multiplexing di OpenVPN: si vede come le due connessioni siano multiplexate su un unico protocollo L4, in questo caso UDP. <https://openvpn.net/index.php/open-source/documentation/security-overview.html>

chiama *OpenVPN AS – Access Server*, offre una web GUI, sicuramente più intuitiva rispetto ai file di configurazione con cui si amministra la versione open source (detta *Community Edition*)[20]. D'ora in poi ci si concentra su quest'ultima versione, a livello di VPN le funzionalità sono le stesse; per una comparazione tra le due versioni si veda [19].

L'infrastruttura OpenVPN si compone di:

- server: in grado di connettere tra loro diversi client, è possibile regolare il fatto che diversi client possano comunicare tra loro o meno
- client, il quale si connette al server.

E' necessario che il server abbia un indirizzo IP pubblico, o meglio ancora un nome DNS, in ogni caso deve essere raggiungibile da Internet. E' possibile avere

il server dietro un firewall, a patto di abilitare il port forwarding dal gateway al server.

L'autenticazione tra i diversi membri della VPN può essere fatta in due modi:

- **certificate-based**, cioè autenticazione basata su chiavi private e certificati X509. I passi da seguire sono:
 - creazione di una nuova CA, quindi della coppia di chiavi e di un certificato self-signed
 - ciascun membro della VPN deve avere la propria coppia di chiavi e certificato
 - il certificato della CA deve essere presente in ogni macchina partecipante
- **PSK**: si generano a priori delle chiavi statiche, che devono essere distribuite a ciascun host membro della VPN. Questa modalità non è consigliata, in quanto se un host venisse in qualche modo compromesso, occorrerebbe cambiare tutte le chiavi. Inoltre non si garantisce *perfect forward secrecy*: se un avversario intercettasse il traffico sull VPN e poi ottenesse queste chiavi potrebbe decifrarlo senza problemi.

E' possibile inoltre configurare anche username e password per ciascun client. Si possono realizzare sia topologie *Remote Access* sia *LAN-to-LAN*, per ciò che concerne la configurazione effettiva di OpenVPN, le due cose sono praticamente identiche, se si vuole realizzare l'ultima topologia occorre però definire diverse rotte nelle reti partecipanti. In particolare, l'host VPN (client o server) deve essere configurato come gateway per le reti raggiungibili mediante l'*altro* host VPN a cui è connesso.

Infine, client e server sono implementati nello stesso singolo programma, la distinzione viene fatta nel file di configurazione.

2.5.2 OpenVPN e MoonCloud

Si passa ora ad analizzare le possibilità di implementare OpenVPN in MoonCloud al livello 3. Il primo step da fare è decidere dove posizionare il server: nel cloud o nella rete target?

Local Server Con questa opzione si preparano nella rete MoonCloud una serie di VM destinate ad essere VPN server; se esse sono configurate propriamente, ciascun server può servire diverse reti target. I *probe* hanno delle rotte configurate del tipo `<rete target>` via `<VPN server>`. Nelle reti dei client si porta quindi un device che funge da VPN client. Tale appliance deve rendere visibile l'intera rete (possibilmente anche più di una) nella VPN. In particolare si pone un problema di routing nella rete target a prescindere che lì vi sia il server od il client, pertanto è descritto tra qualche riga.

Remote Server Portare un server nella rete target pone subito un problema: deve essere raggiungibile dall'esterno, e questo non è per niente facile poiché la maggior parte delle reti target utilizzano NAT, e quindi gli host interni

non sono direttamente raggiungibili dall'esterno, se non con port forwarding sul router. Chiedere ai clienti di configurare questo non è pensabile, pertanto questa opzione non è stata consigliata ed infatti non è stata presa effettivamente in considerazione come soluzione. In via del tutto ipotetica, se si fosse scelta questa strada si sarebbe poi dovuto decidere anche come configurare i client VPN, cioè se scegliere tra *RSMC* o *RSSC*.

Il problema comune ad entrambe queste due opzioni è il seguente: in una configurazione *normale* i pacchetti provenienti dai *probe* e diretti ai target, una volta che sono decifrati ed immessi nella rete dal VPN client (poiché l'opzione server è stata scartata) hanno come indirizzo IP sorgente un IP che si trova nella rete MoonCloud, ed i target non hanno modo di sapere che le risposte a tali pacchetti devono passare per il VPN client. La soluzione a cui si era già pensato in questa prima fase di studio è stata quella del *NAT al contrario*, per cui i pacchetti immessi nella rete target dal VPN client vengono NAT-tati ed hanno come IP sorgente quello del VPN client, che si trova nella stessa rete dei target e quindi le risposte torneranno ad esso direttamente.

2.5.3 Conclusioni

Per ciò che concerne OpenVPN, si è consigliato di realizzare una soluzione *Local Server* per evitare di dover configurare port forwarding nella rete target. Nel caso in cui questo problema non si dovesse presentare, ad esempio perché la rete target disponesse di un pool di IP pubblici, sarebbe possibile tentare la strada di un *Remote Server*.

2.6 SoftEther

2.6.1 Overview

SoftEther [35] è una tecnologia per VPN molto particolare, sviluppata dallo studente giapponese D. Nobori per la sua tesi di laurea magistrale, è un progetto attivamente sviluppato, open source e gratuito.

E' disponibile cross-platform, Linux, MAC OS X e Windows. Per le versioni MAC OS X e Windows è disponibile un'interfaccia grafica sia per client sia per server, che consente di fare configurazioni in maniera molto intuitiva; su Linux bisogna cavarsela con file di configurazione ed una shell (*vpncmd*).

La particolarità di questo software è che in grado di gestire anche *altri* protocolli VPN, oltre ad uno sviluppato ad hoc:

- SoftEther (VPN over HTTPS)
- OpenVPN (L2 e L3)
- SSTP (PPTP over TLS)
- L2TP/IPsec
- L2TPv3/IPsec

- EtherIP

Il grande vantaggio che dà l'utilizzo del protocollo SoftEther è l'incapsulamento in HTTPS, per cui si usa tutta la sicurezza derivante da TLS, unitamente al fatto che praticamente qualsiasi firewall lascerà passare tale traffico.

La figura 2.6 mostra come funziona SoftEther.

SoftEther è composto da diversi software:

- *VPN Server*: il componente server in grado di gestire i multipli protocolli VPN
- *Virtual Hub* che, a dispetto del nome, è uno switch che viene usato internamente dal VPN Server per collegare i diversi tunnel (uno per ogni protocollo)
- *Virtual L3 Switch*: anche in questo caso il nome trae in inganno, poiché si tratta di un router che si utilizza in topologie LAN-to-LAN.
- *Local Bridge*: componente del server che viene usato per collegare la rete dei Virtual Hub alla rete fisica su cui si trova il server VPN. E' necessario avere un'interfaccia di rete reale dedicata che sia connessa alla rete fisica (su cui non sia attivo nessun protocollo di rete); è possibile anche utilizzare una scheda di rete virtuale usando TAP al layer 2¹. E' consigliabile una NIC di buona qualità, che possa lavorare in modalità promiscua. Non è obbligatorio avere questa seconda interfaccia, sebbene sia caldamente consigliato.
- *VPN Bridge* è la combinazione di *Virtual Hub* e *Local Bridge* che consente di collegare tra loro diverse reti in VPN (e non singoli host). E' utilizzato lato client per realizzare topologie LAN-to-LAN.
- *VPN Client* è il classico componente client che connette un PC ad una VPN. Utilizza il protocollo SoftEther VPN sopra descritto. Come client si può comunque utilizzare un qualsiasi software che usi uno dei protocolli sopra citati. E' da utilizzare solo in configurazioni Remote Access.

Con SoftEther si possono realizzare diverse topologie:

- **Remote Access.** Si crea in maniera molto semplice un nuovo server, mediante la GUI o la linea di comando. Dal punto di vista logico si fanno i seguenti passaggi:
 1. creazione di un nuovo server;
 2. creazione di un nuovo *Virtual Hub* che "riceve le connessioni";
 3. connessione del *Virtual Hub* alla scheda di rete del server (possibilmente dedicata a fare questo). Così facendo si dà accesso alla rete in cui si trova il server.
 4. Connessione al server utilizzando il software client.

¹TAP è un modulo del kernel Linux che consente di creare NIC virtuali al livello 2.



Figura 2.6: Il design di SoftEther. Mediante il *Virtual Hub* si collegano i diversi moduli. <https://www.softether.org/@api/deki/files/4/=1.2.jpg?size=webview>



Figura 2.7: Configurazione di SoftEther per Remote Access VPN. https://www.softether.org/@api/deki/files/626/=1_remote2.jpg?size=webview



Figura 2.8: Configurazione LAN-to-LAN con SoftEther al layer 2.
<https://www.softether.org/@api/deki/files/325/=10-5-1.png?size=webview>

- **LAN-to-LAN.** E' possibile scegliere se collegare le diverse LAN a livello 2 o a livello 3. Una volta scelta la topologia che si preferisce si crea un *VPN server*, poi occorre differenziare in base al livello.
 - L2 [31]:
 1. sulla rete da connettere al server si crea un nuovo *VPN Bridge*
 2. si connette il bridge al server (si chiama *cascaded connection*)
 3. si connette il bridge alla LAN locale utilizzando *Local Bridge*.
 - L3 [32]:
 1. sul server si creano n *Virtual Hub*, uno per ogni LAN remota che si vuole collegare; esso "accumula" tutte le connessioni provenienti da ciascuna LAN;
 2. si configura un *Virtual L3 Switch* che connette i 3 hub. A dispetto del nome, esso si comporta come un router, per cui avrà n interfacce di rete, ciascuna di esse con un indirizzo IP compatibile con quello della LAN remota. Per cui l'interfaccia connessa al *Virtual Hub 1* dovrà avere un IP che sia compatibile con gli indirizzi IP della LAN che si "accumula" nel *Virtual Hub 1*.
 3. Per ciò che concerne i client, si utilizza un *VPN Bridge* come per L2.
 4. L'ultimo step prevede di configurare, su ciascun default gateway delle LAN, una rotta fatta così: per raggiungere la LAN x inoltra all'indirizzo IP relativo nel *Virtual L3 Switch*.

SoftEther possiede alcune caratteristiche molto interessanti, oltre a quelle già citate:

VPN over ICMP e VPN over DNS Due opportunità non completamente stabili (il sito ufficiale stesso riporta che a volte si verificano degli errori) per il

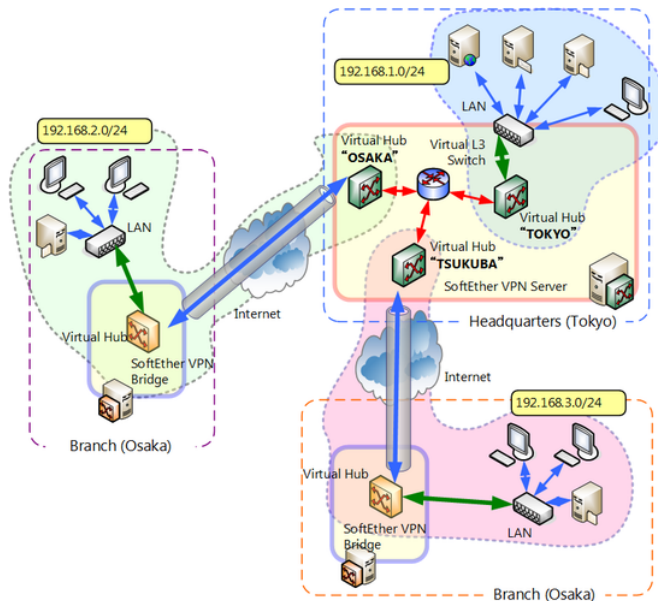


Figura 2.9: Configurazione LAN-to-LAN con SoftEther al layer 3.
<https://www.softether.org/@api/deki/files/326/=10-6-1.png?size=webview>

quale si incapsula il traffico in pacchetti ICMP o DNS per bypassare anche i firewall più stringenti. Occorre valutare *quanto* siano stringenti tali firewall, perché anche queste soluzioni potrebbero non essere praticabili (ad esempio se si usa un server DNS interno e sul firewall si configura l'abilitazione al protocollo DNS solo se proveniente da tale server)[36].

NAT Traversal Se il server si trova dietro ad un NAT, è comunque possibile connettersi poiché esso si occupa di fare continue connessioni verso l'esterno in modo che, quando un client tenta di connettersi il NAT lascia passare la connessione [33].

Dyamic DNS Non occorre che si possieda un indirizzo IP statico per identificare il server. Gratuitamente SoftEther registra un nuovo nome DNS per ciascun server che viene installato, ed aggiorna automaticamente tale nome sulla base degli assegnamenti degli ISP (verificando quale sia l'IP del server che si connette all'infrastruttura SoftEther).

SecureNAT Si tratta di una tecnologia sviluppata appositamente per SoftEther ed è integrata nel server e nel *VPN Bridge*, e consiste di un DHCP+NAT eseguiti interamente in *userspace* [34]. Per ciascun *Virtual Hub* è possibile abilitare questa funzione, ciò fa sì che si crei una nuova interfaccia di rete virtuale connessa al *Virtual Hub* come se fosse un altro computer collegato in VPN, ed infatti, per gli altri host, la scheda virtuale appare proprio come un altro computer. Può essere usato per vari scopi:

- **Network Gateway:** *SecureNAT* può essere usato come alternativa al *Local Bridge* per connettere un *Virtual Hub* alla rete fisica. Si usa una nuova interfaccia virtuale che viene connessa al *Virtual Hub*.

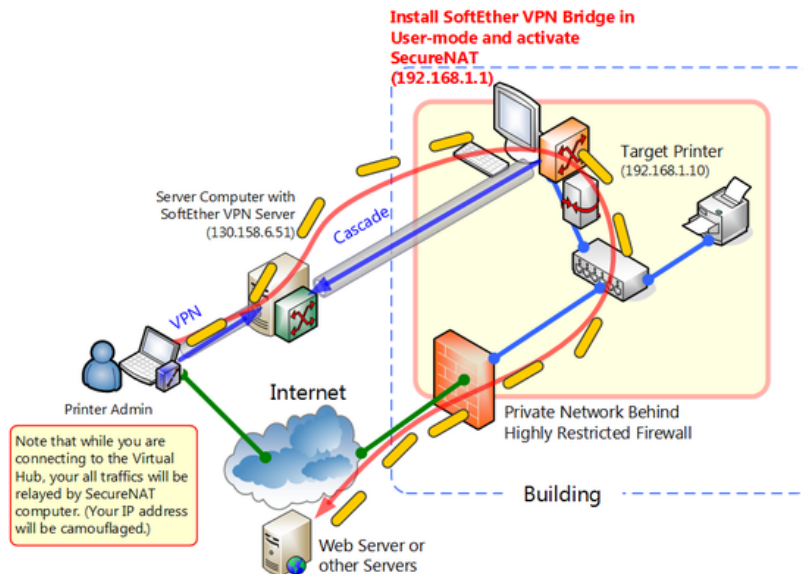


Figura 2.10: La topologia realizzata con *SecureNAT*. <https://www.softether.org/@api/deki/files/342/=10-11-9.png?size=webview>

- DHCP Server: è possibile scegliere di abilitare solo la funzione di DHCP Server in *SecureNAT*, pertanto tale server assegnerà gli indirizzi IP agli alle interfacce dei client connesse al *Virtual Hub* a cui l'interfaccia *SecureNAT* è collegata.
- Remote Access. Questa è in assoluto la caratteristica più interessante, le cui potenzialità andrebbero studiate nel dettaglio. Normalmente, quando ci si vuole connettere ad una rete da remoto è necessario installare su in essa *VPN Server*, e di conseguenza connettersi da un client. Usando *SecureNAT* è invece possibile invertire questo paradigma. La figura 2.10 illustra la topologia che si realizza.

Senza scendere troppo nei dettagli, si illustrano gli step necessari. Per *rete remota* si intende la rete a cui ci si vuole connettere, per *rete principale* si intende la rete da cui la connessione parte, ovvero la rete da cui l'utente fisicamente si collega.

1. Sulla rete principale si crea un server con *Virtual Hub*
2. su un host della *rete remota* si installa e si esegue il *VPN Bridge*
3. si abilita la funzione di *SecureNAT* sul *VPN Bridge*
4. si configura il server della rete principale per creare una nuova connessione verso il *VPN Bridge*.

Ciò che accade è che si è stabilita una *cascaded connection* tra il bridge ed il server (il *Virtual Hub* del server).

5. Per utilizzare davvero questo funzionalità l'utente usa un client VPN e si connette al server. La NIC del client sarà configurata dal DHCP Server di *SecureNAT* integrato nel bridge, ed il bridge stesso sarà il suo default gateway. Tutto il traffico del client andrà verso il bridge, e dal bridge poi uscirà su internet (usando l'IP pubblico del NAT dietro a cui c'è il bridge). Grazie a ciò che SoftEther offre,



Figura 2.11: Comparazione performance delle diverse tecnologie VPN (2012).

<https://www.softether.org/@api/deki/files/12/=1.3.jpg>

non è necessaria alcuna configurazione nella rete remota (se non l'installazione del *VPN Bridge*).

Performance Secondo dei test eseguiti nel 2012 SoftEther *VPN Server* è più veloce (maggiore throughput) di tutte le altre alternative. Il grafico in figura 2.11 mostra il risultato dei test. Si tenga comunque conto che sono benchmark vecchi di 6 anni, e che nel frattempo anche i concorrenti si sono evoluti.

2.6.2 SoftEther e MoonCloud

Dopo aver analizzato SoftEther ora si vedono quali sono le possibili configurazioni per un suo uso in MoonCloud. Si è valutata come migliore soluzione quella basata su incapsulamento in HTTPS di L3, ovvero utilizzare il protocollo SoftEther. La prima distinzione sta nel dove posizionare il server.

Local Server Installare il server nella rete MoonCloud pone un problema non così banale, cioè la necessità (non mandatoria ma caldamente consigliata) di disporre di una scheda di rete da poter configurare in modalità promiscua, ovviamente a livello di VM. E' possibile che dei cloud provider non consentano questo. Nella rete target si porterebbe un'appliance con *VPN Bridge*.

Remote Server In questa configurazione, se l'implementazione di NAT Traversal di SoftEther lo consente, sarebbe possibile per i client raggiungere il server nella rete target anche se dietro ad un NAT. Occorrerebbe poi valutare se utilizzare un unico client in MoonCloud (RSSC) oppure diversi (RSMC); ovviamente per *unico client* si intende un *unico* client per ciascuna rete.

In ogni caso, nemmeno SoftEther può eliminare la necessità di configurare rotte nella rete target, se non con l'utilizzo del già citato *NAT al contrario*.

Oltre a queste soluzioni classiche, si sarebbe potuto sfruttare anche *Secure NAT*. Si tratta di una modalità interessante, che avrebbe richiesto uno studio approfondito per capire come potesse davvero aiutare lo use case in questione. In questo caso:

- l'appliance è costituita dal *VPN Bridge*;

- in MoonCloud si installa il server;
- i container sono client VPN che si connettono al server.

2.6.3 Conclusioni

Per SoftEther, in forza del NAT Traversal, si è consigliato di realizzare una topologia *Remote Server*, eventualmente combinabile con il Dynamic DNS fornito da SoftEther o con uno gestito da MoonCloud. Un ulteriore ed importante vantaggio è che SoftEther utilizza HTTPS. Per tutte queste ragioni SoftEther è stata inizialmente preferita rispetto ad OpenVPN.

2.7 IPsec

2.7.1 Overview

IPsec è una suite di protocolli usata per rendere sicuro il livello 3 dello stack di rete. Mediante crittografia si realizza una connessione che garantisce numerose proprietà di sicurezza. Due protocolli disponibili:

- *AH - Authentication Header*: integrità ed autenticazione (no IP spoofing) del pacchetto con HMAC. E' fondamentale comprendere che questa soluzione non è compatibile con NAT.
- *ESP - Encapsulating Payload*: confidenzialità del pacchetto mediante cifratura simmetrica. Opzionalmente in *ESP* si può abilitare direttamente l'autenticazione e l'integrità, si consiglia questa strada.

Si può abilitare anche la protezione da replay attacks.

Il terzo membro della suite IPsec è *IKE - Internet Key Exchange* che viene utilizzato per negoziare i parametri per i due protocolli precedentemente citati.

IPsec (sia *AH* o *ESP*) può funzionare in due modalità:

- *Transport Mode*: aggiunta di un nuovo header (AH o ESP) tra l'header IP ed il payload. Il suo uso tipico è quello in comunicazioni *dirette* tra due host, che non si affidano a due gateway di confine per eseguire IPsec.
- *Tunnel Mode*: si crea un nuovo pacchetto. Esso è costituito da un nuovo header IP, dall'header IPsec (AH o ESP), e quindi dal payload di IPsec, costituito dal vecchio header IP e dal suo payload.

Per ciò che concerne IKE, è un protocollo abbastanza complesso. Brevemente, la negoziazione dei parametri avviene in due fasi:

- nella *phase 1* viene negoziata una *Security Association* (set di parametri) bidirezionale, utilizzata nella
- *phase 2*; in questa fase si utilizza la SA precedente per negoziare i parametri per la sessione IPsec, tra essi vi sono le chiavi di sessione (stabilite con uno scambio Diffie-Hellman).

Attualmente, è disponibile la versione 2 di IKE. Si tratta di un upgrade importante sotto molteplici punti di vista, ed è fortemente consigliata una implementazione di IPsec che supporti IKEv2. La porta standard utilizzata è la 500 UDP.

L2TP (Layer 2 Forwarding Protocol) è un protocollo standard il cui scopo è quello di realizzare una connessione punto-punto, per cui non include vere funzionalità di sicurezza. L’RFC 3193 standardizza l’uso combinato di IPsec per creare una connessione sicura, sulla quale si negoziano i parametri L2TP [24].

Per realizzare VPN con IPsec tipicamente si utilizzano due configurazioni:

- L2TP on IPsec (negoziante di L2TP su un canale IPsec sicuro—*ESP Transport Mode*)
- IPsec with IKEv2.

Lo stack tipico di IPsec su Linux è il seguente:

- ESP ed AH implementati nel kernel, per cui molto veloci
- demone IKE in *userspace*, negozia le policy per la sessione e le passa al kernel.

L’implementazione IKE di riferimento per Linux, sebbene sia disponibile anche cross-platform, è `strongSwan` [37]. Maggiori dettagli su essa sono descritti tra qualche riga.

E’ possibile realizzare configurazioni Remote Access e LAN-to-LAN. IPsec è uno stack complesso, e configurarlo nella maniera corretta non è facile, tuttavia non è nemmeno impossibile, il sito di `strongSwan` è ricco di esempi e di documentazione [38]. Nella terminologia IPsec con `strongSwan` si definiscono i seguenti termini:

- *roadwarrior* è il client, cioè il dispositivo che si connette da remoto alla rete (*initiator*)
- *VPN Gateway* è il server che accetta le connessioni (*responder*).

Da subito ci si è concentrati su un setup basato su IKEv2, poiché si tratta della versione più recente del protocollo. Non si è considerato IPsec con L2TP visto che utilizza tipicamente IKEv1, ed è considerato *legacy* [41].

Utilizzando `strongSwan` sono possibili moltissime forme di autenticazione, distinguendo tra:

- autenticazione degli host, può essere fatta con PSK (fortemente sconsigliato) o certificati X509
- autenticazione degli utenti, in questo caso è possibile usare anche un server RADIUS.

Si tenga presente che l’autenticazione degli utenti è fatta *on top* dell’autenticazione degli host. Per ciò che concerne un’autenticazione basata su certificati, occorre seguire gli stessi fatti già descritti per OpenVPN, ovvero creare chiavi/certificato per la CA, quindi generare certificati con essa, ecc...

Come per la maggior parte dei software Linux, la configurazione di strongSwan viene fatta mediante file di configurazione. E' di particolare rilevanza configurare correttamente *quali* indirizzi IP vengono incapsulati nel tunnel IPsec, perché le policy presenti nel kernel descrivono anche questo, e se un pacchetto ha sorgente o destinazione IP non corretti sarà droppato dal kernel.

strongSwan è una soluzione molto interessante e completa, alcune caratteristiche che meritano una menzione sono relative ad alcuni algoritmi crittografici supportati:

- supporto a certificati Ed25519 (istanza dell'algoritmo di firma digitale *EdDSA* basato su *Twisted Edward Curves*, particolarmente interessante per numerosi motivi tra cui le performance e la facilità di implementazione)
- supporto ad alcuni algoritmi a chiave pubblica post-quantistici (basati su problemi matematici per i quali i computer quantistici non portano alcun vantaggio nella loro soluzione) come NTRU (*lattice-based cryptography*).

strongSwan offre NAT Traversal basato su UDP.

2.7.2 IPsec e MoonCloud

In IPsec, una volta che le policy sono state stabilite, non vi è davvero distinzione tra chi sia client e server. Si distingue solamente nelle topologie che si realizzano, ed in base a dove si posiziona il client cioè l'*initiator*. Sono quindi possibili sia configurazioni *RS* ed *LS*, un server nella rete target potrebbe sfruttare il NAT Traversal che strongSwan offre, occorrerebbe valutarne l'efficacia. La topologia *LS* è sempre possibile.

2.7.3 Conclusioni

Si è consigliata una topologia *RS*, posto che il NAT Traversal consente la raggiungibilità dall'esterno, in caso contrario *LS*. Vi sono diverse voci fondate dalle dichiarazioni di Snowden, secondo cui l'*NSA avrebbe volontariamente indebolito il protocollo...*² Altre voci invece riportano di come l'*NSA* sia in grado di rompere sessioni IPsec configurate con PSK ([30]). Si rilevano infine due problemi principali:

- complessità: IPsec è costituito da numerosi protocolli e non è generalmente considerato facile da configurare, in particolar modo occorre prestare attenzione alle policy che specificano quali indirizzi IP possono essere incapsulati
- supporto ad UDP: è indispensabile che il traffico UDP sia abilitato perché IKE funziona su tale protocollo.

²La bibliografia in questo è il corso di Sicurezza delle Reti.

2.8 Altre tecnologie

2.8.1 SSTP

Secure Socket Tunneling Protocol è il protocollo VPN di nuova generazione sviluppato da Microsoft [12], il cui client è nativamente integrato in Windows. Il server è tipicamente disponibile nelle versioni Server di Windows, tuttavia esistono dei cloni gratuiti, come SoftEther; vi sono anche client per Linux.

SSTP incapsula in TLS, quindi un protocollo sicuro, tuttavia non offre particolari vantaggi rispetto a SoftEther, inoltre il supporto per piattaforme non-Microsoft va verificato.

2.8.2 OpenConnect

DTLS - Datagram Transport Layer Security è uno standard RFC che specifica una sorta di TLS su UDP, per fornire le stesse garanzie di sicurezza che TLS dà su TCP [27]. Come tale, può essere utilizzato per costruire VPN.

Cisco Any Connect è una soluzione VPN basata su DTLS e HTTPS, e OpenConnect è una soluzione open source sia client sia server compatibile [5] [15] [17]. OpenConnect fornisce una configurazione simile ad OpenVPN [16]. Per ciò che concerne il funzionamento, vi è una prima fase di autenticazione su HTTPS, il traffico poi procede su DTLS, eventualmente si sposta su HTTPS se UDP non è supportato. Da questo punto di vista non si erano rilevati particolari vantaggi rispetto a SoftEther o OpenVPN.

2.8.3 OpenSSH

Secure SHell è un protocollo usato da per creare sessioni sicure di remote shell. La prima versione del protocollo SSH mirava semplicemente a rendere sicura una sessione telnet, mentre la versione 2 rende disponibile un protocollo di trasporto sicuro al di sopra di TCP sul quale è possibile offrire diversi servizi multiplexati su di esso.

Sono offerte vari tipi di autenticazione, tra cui username e password, oppure basata su chiavi pubbliche (negoziata a priori).

Uno dei software più diffusi che implementano questo protocollo è OpenSSH.

Le ultime versioni di tale software consentono anche di creare diversi tipi di tunnel, tra cui anche verso host remoti al livello 2 o 3. Si tratta a tutti gli effetti di una VPN, poiché offre una connettività completa al livello desiderato (non si tratta di *SSH reverse tunnel* o *forwarding*) [40] [7].

Per funzionare si utilizzano delle interfacce di rete virtuali su client e sul server. Si tratta di una soluzione interessante, basata su un protocollo ben noto, tuttavia, ad una prima analisi, non si sono rilevati particolari vantaggi rispetto a SoftEther od OpenVPN.

2.8.4 WireGuard

WireGuard[8] è una moderna soluzione VPN per Linux, creata con i seguenti obiettivi:

- facile da configurare
- sicurezza mediante crittografia:
 - autenticazione con chiavi pubbliche Diffie-Hellman su curva ellittica X25519 e scambiate a priori [11]
 - pacchetti scambiati usando ChaCha20-Poly1305 [13]
 - chiavi di sessione rinegoziate periodicamente
- elevate performance
- minimalità: key exchanging, aggiunta e rimozione delle rotte dal kernel non sono intenzionalmente gestite.

WireGuard è implementato come un modulo del kernel Linux e come tale riesce ad essere molto performante, i benchmark forniti dagli autori riportano un throughput di circa 1 Gbps (figura 2.12). Lavora a livello 3 ed i partecipanti sono dei peer, il protocollo di trasporto è UDP. Per funzionare correttamente con il NAT vi è la possibilità di configurare i peer per mandarsi periodicamente dei keep-alive.

Poiché è una proposta molto interessante, è stata analizzata più in dettaglio rispetto alle altre proposte di questa sezione. Per configurare un peer, posto di avere la chiave pubblica dell'altro endpoint, occorre:

- aggiungere una nuova interfaccia virtuale e configurarla specificandone l'indirizzo IP, sarà l'indirizzo IP del tunnel VPN
- aggiungere le rotte verso le reti indirizzate dagli altri endpoint alla scheda di rete virtuale
- configurare la *cryptokey routing table*, ovvero specificare quali remote sono responsabili di quali reti a livello di VPN[51].

Un'interfaccia WireGuard può gestire più peer, ed occorre che le chiavi pubbliche di tutti i peer a cui ci si vuole connettere siano presenti su tutti i partecipanti. WireGuard ha un grande potenziale, tuttavia è poco configurabile. Questo ha il vantaggio di rendere tale soluzione molto facile da configurare, al prezzo di, semplicemente, avere molte meno opzioni su cui intervenire. In fase di scelta finale, questa soluzione è stata infine scartata perché funzionante su UDP.

2.8.5 IPsec/L2TPv3 e EtherIP/IPsec

- L2TP versione 3 è l'ultimo aggiornamento del protocollo L2TP, principalmente implementato in device Cisco. Analogamente ad L2TP, è possibile usarlo per creare VPN LAN-to-LAN al livello 2. Viene supportato dai principali produttori di apparati di rete, oltre che da Linux.



Figura 2.12: Benchmark tra IPsec, OpenVPN e WireGuard. OpenVPN è la soluzione più lenta poiché è l'unica implementata in *userspace*. <https://www.wireguard.com/performance/>

- EtherIP è un protocollo per l'incapsulamento di frame Ethernet in pacchetti IP, il cui scopo è quello di connettere tra loro diverse LAN a livello 2.

Entrambi i due protocolli devono essere incapsulati in IPsec per ottenere una VPN che garantisca proprietà di sicurezza. EtherIP è supportato da Linux e da SoftEther VPN Server.

Le due tecnologie sono in qualche modo simili, poiché realizzano connessioni a livello 2. Nel caso in cui MoonCloud abbia esigenze di lavorare al livello 2, queste soluzioni sono da prendere in considerazione, sebbene anche OpenVPN e SoftEther supportino VPN a questo layer.

2.8.6 PPTP

Il protocollo *PPTP - Point To Point Tunneling Protocol* è un protocollo *legacy*, sviluppato da Microsoft e non più sicuro, sebbene (purtroppo) ancora usato. Questo protocollo offre VPN, ma non è assolutamente una soluzione praticabile per MoonCloud.

2.9 Conclusioni

In conclusione del capitolo si fornisce un riassunto di pro e contro delle principali tecnologie. Nonostante WireGuard non sia stato analizzato in dettaglio, viene comunque inserito in questa lista grazie ai suoi vantaggi.

OpenVPN • ampio supporto e documentazione

- sicurezza basata su TLS e protocollo custom assimilabile ad esso
- vari tipi di autenticazione
- possibile connessione anche al layer 2
- topologie consigliate:
 1. *LS* con client in *NAT al contrario*
- Contro:
 - utilizzo di TLS su protocollo custom, quindi il traffico non riesce ad essere *spacciato* completamente per HTTPS
 - necessaria gestione dei certificati

SoftEther • multi-protocol e multi-platform

- incapsulamento in HTTPS
- possibile connessione anche al layer 2;
 - bypassa la maggior parte dei firewall
- NAT Traversal del server
- Dynamic DNS
- VPN over ICMP e over DNS
- topologia consigliate:
 1. *RS* senza bisogno di abilitare port forwarding sfruttando NAT Traversal
 2. *LS*
- Contro:
 - necessità di una seconda NIC sul server in modalità promiscua
 - documentazione buona per Windows, meno per Linux

IPsec • IKEv2 dà ampia scelta di configurazioni

- sicurezza mediante ESP (cifatura payload pacchetto IP)
- NAT Traversal
- topologie consigliate:
 1. *LS*
 2. *RS*
- Contro:
 - setup non facile
 - necessaria gestione dei certificati
 - non passa tutti i firewall poiché si tratta di un nuovo protocollo che deve essere abilitato
 - voci di indebolimento da parte dell'NSA

WireGuard • molto più performante di ogni altra soluzione

- altamente sicuro
- keep-alive per funzionare con NAT
- Contro:
 - il sito stesso non lo definisce *production ready*;
 - necessità di scambiare chiavi a priori
 - traffico UDP potrebbe essere bloccato

La soluzione SoftEther con HTTPS è sembrata essere quasi perfetta, se il NAT Traversal funzionasse come dichiarato si sarebbe potuta creare una topologia *RS*. Per firewall molto stringenti sono sembrate molto interessanti le possibilità di incapsulamento in ICMP e DNS, sebbene dichiarate come non completamente affidabili.

L'opzione IPsec con IKEv2 è altrettanto valida, il principale svantaggio è che i firewall più stringenti potrebbero bloccare il traffico *ESP*. In tal caso si può incapsulare *ESP* in *UDP*, ma comunque si richiede che il traffico UDP sia permesso (porta 500).

Come prima soluzione si è scelta SoftEther, ma infine quella utilizzata è OpenVPN. Il prossimo capitolo ne affronta la configurazione nel dettaglio.

Capitolo 3

Configurazioni di OpenVPN

In questo capitolo si vedrà nel dettaglio come OpenVPN è stato configurato per funzionare in MoonCloud, si descriverà anche cosa sia e come funzioni l'*IP Mapping*, il tassello fondamentale alla base della VPN di MoonCloud.

3.1 SoftEther

SoftEther è stata la prima scelta una volta terminato lo studio di cui al capitolo precedente. La ragione di ciò sta principalmente nella funzionalità di NAT traversal e di VPN-over-HTTPS; la configurazione che si era pensata era di tipo *Remote Server*.

Il passo successivo è stato quello di testare tale soluzione in un ambiente virtuale, ecco come si componeva la configurazione nel test iniziale:

- su Amazon EC2: 1 host che fungeva da client VPN
- sul laptop dell'autore, mediante VirtualBox, due reti locali separate (come se fossero due reti target di due clienti diversi)¹, ciascuna composta da:
 - 1 router/firewall di confine che eseguisse il NAT verso l'esterno
 - 1 server VPN
 - due host "normali" con un server web in esecuzione

Tutti i PC coinvolti utilizzavano una distribuzione Linux, in particolare Ubuntu (in versione server su Amazon), mentre i firewall utilizzavano Alpine Linux. L'obiettivo di questo test era, innanzitutto riuscire a connettere client e server in VPN, e quindi poter visualizzare dal client VPN le pagine web offerte dagli host nelle due reti.

I firewall avevano una configurazione di tipo *stateful*, e l'unico traffico ammesso era sulle porte 80 e 443 TCP. Si voleva infatti la capacità di SoftEther di passare tramite un firewall stringente.

Sul server VPN si è installato il componente "*SoftEther VPN Server*", sul client si è invece installato "*SoftEther VPN Bridge*". Realizzare questo primo passo non si è dimostrato facile, a causa della scarsa documentazione disponibile per Linux,

¹<https://www.virtualbox.org/>

ed anche a causa di `vpncmd`, la CLI per gestire SoftEther.

Una volta completata l'installazione, con una certa difficoltà si è scoperto che la funzionalità di NAT traversal tanto importante era disponibile solo su UDP, per forza di cose si è scartata la soluzione *Remote Server* (poiché non c'era modo di contattare il server dietro ad un NAT).

Il passo successivo è stato quindi quello di installare il *SoftEther VPN Server* sull'host in esecuzione nel cloud di Amazon ed il *Bridge* sulla VM che precedentemente ospitava il server. Dopo aver proceduto alla configurazione dei due software, si è tentato di connetterli. Si è notato che client e server riuscivano a comunicare, ma non a portare a termine la connessione. Da una disamina dei log, è apparso un misterioso `Error Code 33`. Un'attenta ricerca sul web non ha portato a risultati, pertanto si è deciso di abbandonare questa tecnologia.

3.2 OpenVPN

Dopo aver scartato SoftEther, si è iniziato a testare OpenVPN. Prima di passare a descrivere la configurazione utilizzata, è utile fare un breve riepilogo ed approfondimento su come OpenVPN funzioni. Già in questo capitolo si discute della sicurezza di OpenVPN; tuttavia si rimanda al capitolo 5 per un'analisi approfondita.

3.2.1 Introduzione

OpenVPN è una tecnologia VPN diffusa ed accettata, in grado di realizzare diverse topologie, incluse l'accesso remoto ed LAN-to-LAN, può incapsulare il livello 2 o al livello 3 dello stack ISO/OSI, e come protocollo di trasporto può utilizzare TCP oppure UDP. OpenVPN è estremamente configurabile, e per questo motivo è molto flessibile, ciò è uno dei suoi maggiori punti di forza.

OpenVPN utilizza due canali tra i due peer, multiplexati su una singola connessione TCP/UDP. Essi sono:

- `Control Channel` una connessione cifrata con TLS utilizzata tra i partecipanti per scambiarsi informazioni di *servizio*, come configurazioni inviate da server a client e negoziazione delle chiavi.
- `Data Channel` la connessione su cui sono effettivamente scambiati i dati della VPN, protetta con un protocollo simile a TLS.

Il `Control Channel` garantisce tutte le proprietà di sicurezza di TLS, tra cui ovviamente autenticazione, confidenzialità ed integrità dei dati scambiati. utilizzando un algoritmo di cifratura a chiave simmetrica combinato con un MAC.

Poiché i due canali sono multiplexati sulla stessa connessione, OpenVPN aggiunge il proprio header dopo l'header del protocollo di livello 4. Il payload del protocollo OpenVPN contiene quindi i dati del `Control` e del `Data Channel` come mostrato in figura 3.1.

Una volta che il normale TLS handshake viene portato a termine ed il `Control Channel` è in funzione, OpenVPN genera delle chiavi simmetriche da utilizzare per proteggere il `Data Channel`. Contrariamente al TLS handshake in

A partire dalla versione 2.0, OpenVPN è una VPN *client-server*, nel senso che vi è un host che svolge il ruolo di server ed accetta più connessioni provenienti dai client. Una volta che tale connessione è stata stabilita, client e server possono essere considerati dei *peer* poiché entrambi possono mandare pacchetti all'altro, senza necessità che un client richieda qualcosa ed il server vi risponda (come in un tradizionale protocollo client-server). Per questo si utilizzerà il termine "peer" quando non sarà necessario distinguere chi sia il client e chi il server.

OpenVPN ricalca esattamente il funzionamento "tipico" di una VPN, in cui server e client sono connessi mediante socket su un protocollo di trasporto, ed i pacchetti scambiati lungo tale socket sono cifrati. Su questo collegamento vi sono quei pacchetti provenienti dalla rete a cui uno di essi appartiene e destinati all'altra. Ciascun partecipante crea quindi una scheda di rete virtuale a cui invia i pacchetti destinati ad host della propria rete, e riceve pacchetti provenienti da essi e destinati alla rete del client.

Si esamina ora il flusso che compie un pacchetto generato da un certo host nella rete del server e destinato ad un host nella rete del client.

1. Il pacchetto viene ricevuto dalla scheda di rete fisica del server e passa al kernel del sistema operativo
2. il sistema operativo provvede ad inoltrare il pacchetto alla scheda di rete virtuale del VPN server
3. il processo OpenVPN riceve il pacchetto, esso è composto dall'header IP come protocollo di più basso livello
4. il processo verifica a quale client inoltrare il pacchetto sulla base delle rotte interne configurate
5. il pacchetto viene inviato cifrato al client designato lungo il socket. Nello specifico, *il vecchio pacchetto viene incapsulato in un nuovo pacchetto, ed il pacchetto incapsulato è cifrato, diventando il payload del pacchetto più esterno*⁵.
6. il pacchetto, dopo aver attraversato Internet, viene ricevuto dalla scheda di rete fisica del client
7. il sistema operativo lo inoltra quindi al socket del client
8. il client decifra il pacchetto e lo scrive sulla sua scheda di rete virtuale
9. il sistema operativo "riceve" il pacchetto e vi applica il routing, quindi lo inoltra alla scheda di rete fisica dell'host
10. il pacchetto viene infine ricevuto dal destinatario

Il pacchetto ricevuto al punto 1 è esattamente identico a quello del punto 10. Tutto ciò presuppone che siano configurate le seguenti rotte:

- nella rete del server:

⁵Ciò che si è descritto, ovvero incapsulare un pacchetto di rete in un altro pacchetto facendolo diventare il payload di quest'ultimo, viene detto *tunneling*.

- *destinazione: rete-client, via: VPN server*; questa configurazione può essere fatta su ogni host della rete oppure sul default gateway
- nella rete del client analogamente:
 - *destinazione: rete-server, via: VPN client*

il VPN server deve essere inoltre configurato per sapere quali client sono responsabili per quali reti (le cosiddette “rotte interne”).

3.2.2 Configurazione base

In questa sottosezione si propongono due esempi di una configurazione “tipica” e minimale per OpenVPN per realizzare una topologia LAN-to-LAN. Si riporta il contenuto dei file di configurazione di client e server, ciascuna entry sarà quindi discussa in dettaglio. Si supponga che la sottorete del server abbia il seguente indirizzo: 192.169.100.0/24, mentre quella del client sia: 192.168.1.0/24. Il server è raggiungibile tramite l’IP pubblico 11.9.250.34.

Configurazione del server

Ecco come si potrebbe presentare il file di configurazione del server.

```
mode server
tls-server

# il protocollo L4
proto tcp

# il tipo di scheda di rete virtuale
# ed il suo nome
dev-type tun
dev server

persist-tun
persist-key

script-security 2

# privileges downgrading
group nogroup
user nobody

# porta di ascolto
port 443

# VPN subnet
server 10.7.0.0 255.255.255.0
```

```
# topologia
topology subnet
client-to-client

# configurazioni TLS
remote-cert-eku "TLS Web Client Authentication"
tls-version-min 1.2
tls-cipher TLS-ECDHE-ECDSA-WITH-AES-256-GCM-SHA384
cipher AES-256-GCM

# certificato CA
ca /etc/openvpn/certs/ca.crt

# key/cert di questo server
key /etc/openvpn/server/server.key
cert /etc/openvpn/server/server.crt

# ECDH anziché DH
dh none

# nuove chiavi Data Channel ogni 20 minuti
reneg-sec 1200

# configurazioni log
log /var/log/openvpn/openvpn-server.log
verb 4
status /var/log/openvpn/openvpn-status.log

# configurazioni keepalive
keepalive 10 60

# informazioni di routing
push "route 192.168.100.0 255.255.255.0"
route 192.168.1.0 255.255.255

# spiegato poi
client-config-dir /etc/openvpn/server/ccd
```

Si supponga infine che il `CommonName` nel certificato del client sia `"client1"`, e che esista un file al percorso `"/etc/openvpn/server/ccd/client1"`. Tale file avrà questo contenuto:

```
iroute 192.168.1.0 255.255.255.0
```

Linea per linea si descrive il contenuto del file:

mode server Indica che OpenVPN opera in modalità server.

tls-server Questa direttiva specifica quale sia il ruolo nel TLS handshake.

proto tcp Indica qual'è il protocollo di trasporto utilizzato, in questo caso è TCP.

dev-type tun Quale tipo di scheda di rete virtuale utilizzare: TUN è un modulo del kernel utilizzato per creare interfacce di rete virtuali al livello 3.

dev server La direttiva "dev" indica che nome dare alla scheda di rete virtuale, in questo caso la si chiama "server".

persist-tun Specifica di non chiudere e riaprire la scheda di rete virtuale tra i vari restart.

persist-key Similmente alla precedente, dice di non rileggere la chiave privata quando una sessione VPN finisce, o quando si ricevono particolari segnali dal sistema operativo.

script-security 2 Specifica quale tipo di programmi esterni è consentito chiamare, in questo caso si consentono script definiti dall'utente.

group nogroup, user-nobody Questa direttiva fa sì che una volta partito, OpenVPN non abbia più privilegi amministrativi.

port 443 Specifica su quale porta il server si deve mettere in ascolto per ricevere connessioni dai client.

server 10.7.0.0 255.255.255.0 Questa direttiva indica che la sottorete assegnata al collegamento VPN è quella indicata.

topology subnet Indica di allocare un indirizzo IP alla scheda di rete virtuale, esso appartiene al pool di IP presente nella direttiva `server`. Il server avrà come IP il primo IP disponibile nella sottorete (quindi 10.7.0.1).

client-to-client Si usa questa opzione per realizzare una connettività completa tra le diverse reti client: se viene inserita nel file di configurazione essa specifica che il server può fare il routing dei pacchetti *tra* i client, e non solo tra i client ed il server stesso.

remote-cert-eku "TLS Web Client Authentication" Direttiva che specifica di che "tipo" deve essere il certificato dei client che si connettono, è un'opzione non obbligatoria ma che migliora la sicurezza.

tls-version-min 1.2 Come si può immaginare, indica quale versione minima del protocollo TLS si deve usare. TLS 1.3 è già diventato standard, ma attualmente non è ancora supportato [26].

tls-cipher TLS-ECDHE-ECDSA-WITH-AES-256-GCM-SHA384 Questa direttiva indica quali ciphersuite di TLS utilizzare nel Control Channel⁶.

cipher AES-256-GCM La direttiva `cipher` specifica quale algoritmo, ed in quale modalità, usare per il Data Channel.

⁶E' bene verificare quale versione di OpenVPN sia in uso e con quale libreria TLS sia stata compilata per una lista completa degli algoritmi supportati.

ca /etc/openvpn/certs/ca.crt Specifica il percorso a cui si trova il certificato della CA usato per creare i certificati dei client. E' indispensabile ai fini della validazione degli stessi.

key /etc/openvpn/server/server.key, cert /etc/openvpn/server/server.crt Indica il percorso a cui si trovano, rispettivamente, la chiave privata del server ed il suo certificato.

dh none Normalmente OpenVPN negozia le chiavi utilizzando il *normale* Diffie-Hellman (aritmetica modulare, utilizzando numero primo), e richiede che i parametri per tale *key agreement* siano generati a priori. Se si vuole utilizzare Diffie-Hellman su curva ellittica (ECHD) occorre specificare "none" come parametro a "dh".

reneg-sec 12000 Le chiavi del Data Channel sono di default rinegoziate ogni ora, volendo essere particolarmente conservativi, si può configurare la rinegoziazione ogni 20 minuti (o un qualsiasi altro valore), come fatto in questo caso. E' sufficiente specificare questa configurazione su un partecipante alla VPN, l'host con la soglia più bassa scatenerà una rinegoziazione.

log /var/log/openvpn/openvpn-server.log Questa direttiva specifica il percorso del file di log.

verb 4 Specifica il livello di verbosità del log, un livello di 4 o 5 è considerato adeguato in produzione, livelli più alti (disponibile fino al 9) sono utilizzati per il debugging.

status /var/log/openvpn/openvpn-status.log Questa direttiva indica quale è il file di *status* in cui OpenVPN scrive informazioni relative alle connessioni con i client.

keepalive 10 60 La direttiva "keepalive" indica ogni quanto OpenVPN deve mandare dei *keepalive* al peer a cui è connesso. Il primo parametro indica ogni quanto mandare dei keepalive (in secondi), mentre il secondo indica dopo quanti secondi considerare la connessione caduta se non riceve niente dal client a cui è connesso. E' sufficiente specificare questa opzione nel server, esso provvederà a trasmetterla al client.

push "route 192.168.100.0 255.255.255.0" Questa direttiva viene usata lato server per inviare delle configurazioni ai client. In questo caso si indica ai client di aggiungere nella routing table del sistema operativo una rotta che apparirà così: rete 192.168.100.0/24 via <virtual NIC's IP>. Essendo 192.168.100.0/24 la rete in cui si trova il server, l'effetto di questa rotta è che ogni volta che l'OS deve decidere dove inoltrare un pacchetto destinato a tale rete, lo invii alla scheda di rete virtuale del client. In questo modo il client VPN lo riceve da essa e lo invia al server lungo il socket.

route 192.168.1.0 255.255.255 Indica di aggiungere una rotta così composta nella routing table dell'OS del server: rete 192.168.1.0/24 via

<virtual NIC's IP>. Poiché 192.168.1.0/24 è la rete del client, l'effetto dell'aggiunta di questa rotta è l'analogo di quello visto al punto precedente, solo che viene applicato localmente.

client-config-dir /etc/openvpn/server/ccd Specifica in quale directory si trovano i file contenenti configurazioni specifiche per ciascun client. Tale directory conterrà una serie di file i quali dovranno chiamarsi semplicemente come il `CommonName` dei certificati dei client. La principale e più importante direttiva nei suddetti file è descritta nel punto successivo.

iroute 192.168.1.0 255.255.255.0 E' molto importante comprendere il significato di questa direttiva e capire che essa si trova dentro un file contenente configurazioni specifiche per un certo client. "iroute" seguito da un indirizzo di rete, indica che *il client a cui il file di configurazione si riferisce è responsabile per la rete 192.168.1.0/24*. Mediante le direttive `iroute`, OpenVPN costruisce una routing table interna, e tramite essa si decide a quale client inviare un certo pacchetto. Bisogna infine tener presente che occorre anche la direttiva `route ...`, poiché essa aggiunge delle rotte alla routing table del sistema operativo, mentre `iroute` solo alla routing table di OpenVPN.

Hook

Oltre alle configurazioni *tipiche* appena mostrate, ve ne sono molte altre. In effetti, uno dei punti di forza di OpenVPN è proprio l'elevatissima configurabilità. Tra le altre cose consente di definire una serie di *hook*, cioè azioni da eseguire (lanciare programmi esterni) quando alcuni eventi si verificano. Esistono degli hook ben precisi, alcuni dei quali sono effettivamente utilizzati nella configurazione di MoonCloud. Per ciascun hook si specifica nel file di configurazione quale azione compiere, cioè quale programma deve essere eseguito.

I programmi lanciati, tipicamente file di testo in un linguaggio di scripting, devono terminare con un valore di uscita secondo la classica semantica per cui 0 indica *successo*, un qualsiasi altro valore *fallimento*. Molti di questi hook sono disponibili solo in modalità server. Alcuni di essi possono essere usati per validare il collegamento con un client: nel momento in cui OpenVPN riceve una connessione può invocare uno (o più) script, ed un valore di ritorno 0 indica di continuare il collegamento, e viceversa.

Ogni script invocato ha a disposizione un certo numero di variabili d'ambiente settate da OpenVPN.

Affinché il server possa eseguire programmi esterni è necessario specificare uno `script-security-level` nel file di configurazione principale. I valori possibili:

- 0: non è possibile chiamare alcun programma esterno
- 1: possibile chiamare solo software del sistema operativo (es: `ifconfig`)
- 2: consentito chiamare anche script definiti dall'utente
- 3: tra le variabili d'ambiente vi possono essere anche password

Si presenta la lista degli hook disponibili in ordine di esecuzione, si noti che ciascun hook prevede delle diverse variabili d'ambiente.

- `up`, eseguito dopo un socket bind
- `tls-verify` eseguito durante il TLS handshake quando l'identità del client non è stata ancora verificata
- `ipchange`: quando il client è stato autenticato od il suo IP remoto cambia
- `client-connect`, eseguito immediatamente quando il client è stato autenticato, disponibile solo per il server
- `route-up`, eseguito anch'esso immediatamente quando la connessione è stata autenticata
- `route-pre-down`: eseguita immediatamente prima che una rotta aggiunta venga rimossa in seguito ad una terminazione della connessione
- `client-disconnect`, disponibile solo per il server, eseguita quando un client si disconnette
- `down`: hook che si verifica quando il socket o l'interfaccia virtuale vengono chiusi
- `learn-address`: disponibile solo per il server, si verifica quando una nuova rotta è aggiunta alla routing table interna di OpenVPN
- `auth-user-pass-verify`: eseguita sul server quando un client si connette e non è ancora stato autenticato

Configurazione del client

Si passa quindi a descrivere la configurazione di un ipotetico client OpenVPN in riferimento all'esempio precedente.

```
client
```

```
proto tcp
```

```
# IP porta del server
remote 11.9.250.34 443
```

```
verify-x509-name openvpn.example.com name
```

```
dev-type tun
dev client
```

```
persist-tun
persist-key
```

```
# privileges downgrading
group nogroup
user nobody

# tls config
remote-cert-eku "TLS Web Server Authentication"
tls-version-min 1.2
tls-cipher TLS-ECDHE-ECDSA-WITH-AES-256-GCM-SHA384
cipher AES-256-GCM

ca /etc/openvpn/certs/ca.crt

key /etc/openvpn/client1/client1.key
crt /etc/openvpn/client1/client1.crt

# configurazione log
log /var/log/openvpn/openvpn-client1.log
verb 4
status /var/log/openvpn/openvpn-client1.log
```

Ciò che si può notare è che il file sia abbastanza simile a quello del server, sebbene manchino le direttive di routing. Ovviamente, “client” è l’opposto di “mode server” e “tls-server”. Infatti, la direttiva “client” include:

- pull direttiva usata per accettare configurazione inviate dal server mediante “push”
- tls-client che è l’opposto di “tls-server”.

“verify-x509-name openvpn.example.com name” indica che occorre controllare che il nome (“name”) contenuto nel certificato combaci con quello specificato (“openvpn.example.com”). Si può notare la presenza di “remote 11.9.250.34 443”, essa indica l’indirizzo IP pubblico mediante il quale è possibile contattare il server, e la porta su cui è in ascolto.

La direttiva “push “route ...” non è presente perché può essere solo nel file di configurazione del server, mentre “route <rete-altro-peer>” non c’è ma il suo effetto, cioè aggiungere <rete-altro-peer> alla routing table del proprio OS c’è comunque grazie a push lato server. Una volta che il collegamento tra i due è stato stabilito vi sarà una entry nella routing table del kernel così fatta: rete 192.168.100.0/24 via <virtual NIC’s IP>. Non possono nemmeno esserci direttive “iroute”, perché il client si connette ad un solo altro endpoint che è il server.

Non è presente l’opzione di “keepalive” perché, come detto in precedenza, è sufficiente specificarla solo sul server.

L’indirizzo IP della scheda di rete virtuale del client sarà assegnato dal server scegliendo il primo IP libero nella subnet VPN.

Infine, affinché si possa realizzare un collegamento LAN-to-LAN, è necessario che nelle due (in questo caso) reti coinvolte sia stato configurato correttamente il routing. In particolare si richiede che, per ciascuna rete, sia configurata una rotta

che dica come raggiungere l'altra rete remota.

Nell'esempio in questione, è necessario che tutti gli host della rete del server, cioè 192.168.100.0/24 sappiano che per inviare pacchetti ad host di 192.168.1.0/24 (rete del client), occorre inoltrare tali pacchetti al VPN server. Allo stesso modo, nella rete 192.168.1.0/24 vi deve essere configurata una rotta per raggiungere 192.168.100.0/24 tramite il client.

Queste due configurazioni possono essere aggiunte su ciascun host delle due reti oppure, più ragionevolmente, esse saranno solo applicate sui due default gateway. È importante capire questo passaggio, poiché è alla base delle soluzioni descritte nella prossima sezione. Infatti, *per poter configurare una rotta su un router occorre aver accesso al router*, ma ragionevolmente si vuole evitare di dover configurare il router del cliente ogni volta che si vuole effettuare un'analisi nella sua rete...

3.3 Problematiche di configurazione

Nella precedente sezione si è descritto OpenVPN e si è mostrato una configurazione tipica. A questo punto, prima di dettagliare come OpenVPN è stata configurato per MoonCloud, è necessario soffermarsi su quali siano le problematiche che i particolari requisiti di VPN per MoonCloud introducono. Per ciascun problema si analizza anche la relativa soluzione adottata. Durante questa sezione si potrà notare l'elevata versatilità di OpenVPN, grazie alle numerosissime opzioni di configurazione possibili.

Prima di procedere, si tenga presente che la configurazione *definitiva* è di tipo *Local Server - LS*, con i server OpenVPN installati in MoonCloud, e nelle reti target vi sono i client.

3.3.1 Impossibilità di aggiungere configurazioni alla rete target

Il problema

A questo problema era già stata pensata una soluzione nella fase iniziale di valutazione delle diverse VPN. Il quesito è il seguente: *per realizzare una topologia LAN-to-LAN è necessario configurare delle rotte sui router di confine, ma non è pensabile di operare sul router della rete target. Come fare?* Per cercare di comprendere meglio il problema, si analizza il flusso seguito da un ipotetico pacchetto inviato da un *probe* dalla rete MoonCloud alla rete target, posto che il collegamento sia stato instaurato con successo. Naturalmente, non vi sono problemi nel configurare rotte lato MoonCloud. Si supponga quindi di trovarsi nel seguente scenario:

- rete target: 192.168.100.0/24
- rete MoonCloud: 192.168.200.0/24
- indirizzo IP interno VPN server: 192.168.200.20
- indirizzo IP pubblico VPN server: 100.4.78.5
- indirizzo IP del *Docker host*: 192.168.200.2

- indirizzo IP VPN client: 192.168.100.50
- subnet VPN: 10.7.0.0/24
- indirizzo IP scheda di rete virtuale VPN server: 10.7.0.1
- indirizzo IP scheda di rete virtuale VPN client: 10.7.0.2
- CommonName del VPN client: client100

Sul *Docker host* di MoonCloud è configurata la seguente rotta: 192.168.100.0/24 via 192.168.200.20 che specifica che per contattare la rete target è necessario passare per il VPN server. Oltre ad essa, naturalmente, il server ed il client VPN hanno configurato le rotte come si è visto nella sezione precedente (per cui si dice “rete dietro l’altro endpoint via virtual NIC’s IP”).

Si supponga quindi che un *probe* generi un pacchetto di qualsiasi tipo destinato ad un host della rete target, ad esempio 192.168.100.254. Il flusso seguito dal pacchetto è quello descritto di seguito.

1. Il *probe* genera il pacchetto, la sorgente di tale pacchetto è 192.168.200.2, la destinazione 192.168.100.254⁷
2. il sistema operativo del *Docker host* consulta la propria routing table ed instrada il pacchetto verso 192.168.200.20
3. il sistema operativo del VPN server riceve il pacchetto, consulta la routing table e trova l’entry 192.168.100.0/24 via 10.7.0.1, quindi inoltra alla scheda di rete virtuale di OpenVPN
4. OpenVPN riceve il pacchetto, consulta la propria routing table interna e trova l’entry che specifica che il client “client100” è responsabile per la rete 192.168.100.0/24, provvede quindi ad inviarlo a tale client
5. il VPN client riceve il pacchetto dal socket, e lo scrive sulla scheda di rete virtuale
6. il pacchetto destinato a 192.168.100.254 viene ricevuto dal sistema operativo, dopo aver compiuto le dovute operazioni di routing viene quindi inviato sulla scheda di rete fisica dell’host
7. 192.168.100.254 riceve il pacchetto, lo elabora, produce una risposta, la destinazione di tale risposta è 192.168.200.2
8. il sistema operativo di 192.168.100.254 invia la risposta al proprio default gateway come avviene in tutti i casi in cui un host non abbia una rotta ben determinata per un pacchetto

⁷Volendo essere precisi, al momento della generazione del pacchetto in un container Docker, la sua sorgente è l’indirizzo IP di tale container, che poi viene modificato da Docker nell’indirizzo IP dell’host in cui il container è esecuzione, ai fini dell’esempio questo non è importante.

9. il default gateway della rete `192.168.100.0/24` riceve il pacchetto destinato a `192.168.200.2`. Esso può dropparlo in quanto indirizzo privato, o comunque inviarlo su Internet. In ogni caso non raggiungerà la destinazione corretta.

In conclusione quindi, il problema sta nel fatto che nella rete target manca una rotta che dica che per raggiungere `192.168.200.0/24` occorre contattare il VPN client. Di nuovo, non è pensabile di dover configurare ogni rete target in questa maniera, poiché l'utilizzo di MoonCloud deve essere il più possibile *leggero*; la necessità di dover configurare al router potrebbe infatti scoraggiare un potenziale cliente dall'usare MoonCloud.

3.3.2 La soluzione

La soluzione a ciò è semplice, ovvero far sì che tutti i pacchetti inviati dal VPN client provenienti dalla VPN e destinati alla rete target abbiano come indirizzo IP sorgente l'indirizzo IP del device stesso. In questo modo, quando si produce la risposta, la destinazione di tale pacchetto è un indirizzo IP appartenente alla stessa rete in cui si è, ovvero la rete target. L'OS quindi invia il pacchetto al device client, il quale provvede quindi a modificare l'IP destinazione nell'IP di destinazione *vero*, ovvero quello del *Docker host*. Ciò che avviene quindi è che il device client fa del NAT, come se la rete target fosse la rete *esterna* verso la quale il NAT è tipicamente eseguito. Questa configurazione di NAT viene qui chiamata "*NAT al contrario*", ed è eseguita con *iptables*⁸.

In questo caso, un singolo comando ad *iptables* risolve tutto questo problema:

```
iptables -t nat -A POSTROUTING -d 192.168.100.0/24 -s
↪ 192.168.200.0 -j MASQUERADE
```

Utilizzare il NAT introduce appartenente un'altra problematica, ovvero il fatto che solo risposte a richieste provenienti da `192.168.200.0/24` possono "passare" il NAT: in questo caso però non vi è alcun problema, proprio perché i pacchetti che vengono inviati da `192.168.100.0` sono risposte a `192.168.200.0/24`. Si analizza ora nuovamente il flusso indicato sopra alla luce del *NAT al contrario*.

1. Il *probe* genera il pacchetto, la sorgente di tale pacchetto è `192.168.200.2`, la destinazione `192.168.100.254`.
2. il sistema operativo del *Docker host* consulta la propria routing table ed instrada il pacchetto verso `192.168.200.20`
3. il sistema operativo del VPN server riceve il pacchetto, consulta la routing table e trova l'entry `192.168.100.0/24` via `10.7.0.1`, quindi inoltra alla scheda di rete virtuale di OpenVPN
4. OpenVPN riceve il pacchetto, consulta la propria routing table interna e trova l'entry che specifica che il client "*client100*" è responsabile per la rete `192.168.100.0/24`, provvede quindi ad inviarlo a tale client

⁸<https://netfilter.org/projects/iptables/index.html>

5. il VPN client riceve il pacchetto dal socket, e lo scrive sulla scheda di rete virtuale
6. il pacchetto destinato a 192.168.100.254 viene ricevuto dal sistema operativo, dopo aver compiuto le dovute operazioni di routing decide di inviarlo sulla scheda di rete fisica dell'host
7. il pacchetto passa per l'hook di POSTROUTING, e si modifica l'indirizzo IP sorgente in 192.168.100.50
8. 192.168.100.254 riceve il pacchetto, lo elabora, produce una risposta, la destinazione di tale risposta è 192.168.100.50
9. il sistema operativo di 192.168.100.254 invia la risposta a 192.168.100.50
10. il sistema operativo di 192.168.100.50 riceve il pacchetto ed esegue l'inverso del NAT, l'indirizzo IP destinazione appare ora essere 192.168.200.2. Poiché il client ha una rotta che dice: rete 192.168.200.2 via <virtual NIC's IP> tale pacchetto viene inoltrato alla scheda di rete virtuale,
11. il pacchetto viene ricevuto da OpenVPN ed inviato al server
12. il server OpenVPN riceve il pacchetto e lo scrive sulla scheda di rete virtuale
13. il sistema operativo del server riceve il pacchetto e lo inoltra quindi a 192.168.200.2.

3.3.3 Dinamicità della creazione dei client

3.3.4 Il problema

Si è visto precedentemente che è necessario introdurre nel file di configurazione del server due direttive fondamentali per ogni client, esse sono:

- `route <rete-client>`
- `iroute <rete-client>` (nel file di configurazione specifico)

Il file di configurazione viene letto da OpenVPN all'avvio... Il problema ora è il seguente: *come poter aggiungere nuovi client dinamicamente al server senza bisogno di riavviarlo?*

3.3.5 La soluzione

La soluzione di questo problema sfrutta gli hook `client-connect` e `client-disconnect`. L'idea è quella di eseguire direttamente un comando per l'aggiunta di una rotta al kernel del sistema operativo quando un client si connette, e di rimuoverla quando si disconnette. L'effetto di "route" è proprio questo, quindi ciò che si fa è di eseguire i comandi che sarebbero eseguiti da OpenVPN in maniera diretta.

Per quanto riguarda la direttiva "iroute" invece non ci sono problemi, una

volta che “client-config-dir” è stata configurata correttamente, è possibile aggiungere in tale cartella il file specifico per il nuovo client con la direttiva “iroute”.

Il file di configurazione del server quindi non presenta più le direttive di tipo “route”, vi sono però le seguenti aggiunte:

```
client-up /etc/openvpn/server/cs/client-up.sh
client-down /etc/openvpn/server/cs/client-down.sh
```

Quando OpenVPN esegue i due script passa ad essi alcune variabili, in particolare quella di interesse è `common_name`, che indica il nome presente nel certificato fornito dal client.

Si supponga ora che vi sia un secondo client, chiamato “client50” responsabile per la rete 192.168.50.0/24; OpenVPN rilegge i due script ad ogni connessione/disconnessione, pertanto è possibile aggiornarli mentre esso è in esecuzione. Ecco come si presentano i due file:

```
# /etc/openvpn/server/cs/client-up.sh

#!/bin/bash

if [ "$common_name" == "client100" ]; then
    ip route add 192.168.100.0/24 via 10.7.0.1
fi
if [ "$common_name" == "client50" ]; then
    ip route add 192.168.50.0/24 via 10.7.0.1
fi

# /etc/openvpn/server/cs/client-down.sh

#!/bin/bash

if [ "$common_name" == "client100" ]; then
    ip route del 192.168.100.0/24 via 10.7.0.1
fi
if [ "$common_name" == "client50" ]; then
    ip route del 192.168.50.0/24 via 10.7.0.1
fi
```

Nel momento in cui un client si connette, si aggiunge una nuova rotta nel kernel del sistema operativo, e quando si disconnette la si rimuove.

La ragione per cui si usa “if-fi, if-fi” e non “if-elif-fi” è che questo file viene generato automaticamente, ed utilizzare “if-fi, if-fi” è più semplice: quando si aggiunge un nuovo client è sufficiente aggiungere un nuovo “if-fi” al file, mentre se si fosse seguita la seconda strada sarebbe stato necessario modificare l’ultimo “fi” in un “elif”.

Quindi, sfruttando le direttive “client-connect” e “client-disconnect” si è trovato un modo per bypassare la staticità del file di configurazione del server.

3.3.6 Dinamicità delle rotte server-side

Il problema

Questo problema è simile al precedente. La direttiva `"push route <server-net>"` viene utilizzata nel server per indicare al client quale sia la/e rete/i che si trovano "dietro" il server OpenVPN e che si vuole far sì che il client possa raggiungere. Questo presuppone di sapere in partenza quali siano queste reti, ma in un ambiente dinamico quale MoonCloud ciò non è possibile. Può capitare che i *Docker host* che vengono aggiunti on-demand appartengano alla stessa rete del server, come può anche capitare che appartengano ad un'altra rete che il server a priori non conosce. Il quesito da risolvere in questo caso è il seguente: *come gestire la dinamicità delle rotte lato server senza bisogno di riavviare il server?* Prima di vedere la soluzione si esamina il flusso di un pacchetto nel caso in cui tale direttiva non venga più inclusa, sempre assumendo le configurazioni precedenti.

1. Il *probe* genera il pacchetto, la sorgente di tale pacchetto è 192.168.200.2, la destinazione 192.168.100.254
2. il sistema operativo del *Docker host* consulta la propria routing table ed instrada il pacchetto verso 192.168.200.20
3. il sistema operativo del VPN server riceve il pacchetto, consulta la routing table e trova l'entry 192.168.100.0/24 via 10.7.0.1, quindi inoltra alla scheda di rete virtuale di OpenVPN
4. OpenVPN riceve il pacchetto, consulta la propria routing table interna e trova l'entry che specifica che il client "client100" è responsabile per la rete 192.168.100.0/24, provvede quindi ad inviarlo a tale client
5. il VPN client riceve il pacchetto dal socket, e lo scrive sulla scheda di rete virtuale
6. il pacchetto destinato a 192.168.100.254 viene ricevuto dal sistema operativo del VPN client, dopo aver compiuto le dovute operazioni di routing decide di inviarlo sulla scheda di rete fisica dell'host
7. il pacchetto passa per l'hook di POSTROUTING e si modifica l'indirizzo IP sorgente in 192.168.100.50
8. 192.168.100.254 riceve il pacchetto, lo elabora, produce una risposta, la destinazione di tale risposta è 192.168.100.50
9. il sistema operativo di 192.168.100.254 invia la risposta a 192.168.100.50
10. il sistema operativo di 192.168.100.50 riceve il pacchetto ed esegue l'inverso del NAT, l'indirizzo IP destinazione appare ora essere 192.168.200.2
11. poiché non vi sono rotte configurate per 192.168.200.0/24, il sistema operativo decide di inoltrare il pacchetto al default gateway

12. il default gateway della rete 192.168.100.0/24 riceve il pacchetto destinato a 192.168.200.2, poiché è un indirizzo IP privato ed esso lo instraderebbe su Internet, se è configurato correttamente lo dropa, altrimenti lo invia al suo default gateway ed il dropping del pacchetto viene solo posticipato.

La soluzione

La soluzione è quella di far sì che tutti i pacchetti che provengono dalle reti interne “dietro” il server OpenVPN verso le reti target arrivino ai client *con l'indirizzo IP sorgente uguale all'indirizzo IP della scheda di rete virtuale OpenVPN del server*. Questo è vantaggioso poiché quando si assegna un indirizzo IP ad una scheda di rete, virtuale o meno, il sistema operativo aggiunge automaticamente una rotta verso il NET ID dell'indirizzo assegnato passando per tale scheda di rete. Ad esempio, se si assegna 10.7.0.2/24 a `ovpn-client`, il kernel crea una rotta così fatta: 10.7.0.0/24 dev `ovpn-client1`.

In questo modo le risposte ai pacchetti provenienti dalla VPN hanno come indirizzo IP di destinazione quello della scheda di rete virtuale del server, il quale si trova nella stessa subnet VPN della NIC del client, quindi il kernel del VPN client sa dove instradarlo senza che OpenVPN server pubblicizzi delle rotte.

Lato server ciò viene fatto mediante NAT usando iptables, ed i comandi sono ancora una volta presenti nei file specificati nelle direttive “`client-disconnect`” e “`client-disconnect`”.

```
# /etc/openvpn/server/cs/client-up.sh

#!/bin/bash

if [ "$common_name" == "client100" ]; then
    ip route add 192.168.100.0/24 via 10.7.0.1
    iptables -t nat -A POSTROUTING -d 192.168.100.0/24 -j
    ↪ MASQUERADE
fi
if [ "$common_name" == "client50" ]; then
    ip route add 192.168.50.0/24 via 10.7.0.1
    iptables -t nat -A POSTROUTING -d 192.168.50.0/24 -j
    ↪ MASQUERADE
fi

# /etc/openvpn/server/cs/client-down.sh

#!/bin/bash

if [ "$common_name" == "client100" ]; then
    ip route del 192.168.100.0/24 via 10.7.0.1
    iptables -t nat -D POSTROUTING -d 192.168.100.0/24 -j
    ↪ MASQUERADE
```

```

fi
if [ "$common_name" == "client50" ]; then
    ip route del 192.168.50.0/24 via 10.7.0.1
    iptables -t nat -D POSTROUTING -d 192.168.50.0/24 -j
    ↪ MASQUERADE
fi

```

Si descrive quindi il flusso seguito da un pacchetto dall'invio di un pacchetto da parte di un *probe* con questa nuova soluzione.

1. Il *probe* genera il pacchetto, la sorgente di tale pacchetto è 192.168.200.2, la destinazione 192.168.100.254.
2. il sistema operativo del *Docker host* consulta la propria routing table ed instrada il pacchetto verso 192.168.200.20
3. il sistema operativo del VPN server riceve il pacchetto, consulta la routing table e trova l'entry 192.168.100.0/24 via 10.7.0.1
4. il pacchetto transita per l'hook di POSTROUTING, si modifica l'indirizzo IP sorgente in 10.7.0.1, quindi viene inoltrato alla scheda di rete virtuale di OpenVPN
5. OpenVPN riceve il pacchetto, consulta la propria routing table interna e trova l'entry che specifica che il client "client100" è responsabile per la rete 192.168.100.0/24, provvede quindi ad inviarlo a tale client
6. il VPN client riceve il pacchetto dal socket, e lo scrive sulla scheda di rete virtuale
7. il pacchetto destinato a 192.168.100.254 viene ricevuto dal sistema operativo, dopo aver compiuto le dovute operazioni di routing decide di inviarlo sulla scheda di rete fisica dell'host
8. il pacchetto passa per l'hook di POSTROUTING e si modifica l'indirizzo IP sorgente in 192.168.100.50
9. 192.168.100.254 riceve il pacchetto, lo elabora, produce una risposta, la destinazione di tale risposta è 192.168.100.50
10. il sistema operativo di 192.168.100.254 invia la risposta a 192.168.100.50
11. il sistema operativo di 192.168.100.50 riceve il pacchetto ed esegue l'inverso del NAT, l'indirizzo IP destinazione appare ora essere 10.7.0.1
12. il sistema operativo inoltra il pacchetto alla scheda di rete virtuale, (poiché vi è una rotta aggiunta nel kernel che dice di instradare per 10.7.0.0/24 verso 10.7.0.2) viene quindi ricevuto da OpenVPN ed inviato al server
13. il server OpenVPN riceve il pacchetto e lo scrive sulla scheda di rete virtuale
14. il sistema operativo del server riceve il pacchetto ed applica l'inverso del NAT, ora l'indirizzo IP destinazione è 192.168.200.2

15. il pacchetto viene quindi inviato a 192.168.200.2.

Questa soluzione viene detta “NAT lato server”.

3.4 IP mapping

L’ultimo problema che viene descritto è stato anche il più difficile da risolvere, e che, potenzialmente, avrebbe potuto far fallire tutto il lavoro precedentemente fatto.

3.4.1 Il problema

Si è detto in precedenza che si è scelta infine una configurazione *Local Server*, con i server OpenVPN installati in MoonCloud e raggiungibili mediante IP pubblici dai client presenti nella rete target. Per ragioni di costi, si vuole limitare il numero di VM in MoonCloud con OpenVPN in esecuzione, e quindi poter dedicare un singolo server a servire più reti target contemporaneamente. OpenVPN consente di isolare i singoli client connessi ad un server, infatti di default tali client possono comunicare solo con il server, e non con altri client (a meno che si utilizzi la direttiva “client-to-client”).

Per poter realizzare in maniera corretta una topologia del genere è *fondamentale che ogni rete target abbia un spazio di indirizzamento diverso* [23]. Tuttavia qui sorge il problema: ciascuna LAN target ragionevolmente usa uno o più pool di indirizzi privati, i quali sono limitati. In [25] si stabilisce che i seguenti spazi di indirizzi siano riservati per l’utilizzo esclusivo in una rete privata e che non siano instradabili su Internet:

- classe A (subnet mask a 8 byte) 10.0.0.0 – 10.255.255.255
- classe B (subnet mask a 16 byte) 172.16.0.0 – 172.31.255.255
- classe C (subnet mask a 24 byte) 192.168.0.0 – 192.168.255.255

Può accadere che tali indirizzi siano utilizzati con una subnet mask diversa, ad esempio 10.1.1.0/24. Rimane comunque il fatto che i detti prefissi sono tipicamente quelli che si trovano in una qualsiasi LAN con IPv4.

E’ chiaro che la probabilità che diverse reti target abbiano lo stesso NET ID è alta, diventa quindi un grosso problema poter collegare più reti target ad uno stesso VPN server, proprio a causa della possibilità che prima o poi si verifichi un conflitto.

Stabilire a priori un mappaggio tra VPN server e reti clienti (es: si definisce il server OpenVPN_1-20 che gestirà reti 10.0.0.0/24 – 10.20.20.0/24) non risolve il problema: cosa fare se ad un certo punto ci si trova con due clienti con entrambi 10.1.1.0/24?

Un’altra soluzione potrebbe essere quella di allocare un server OpenVPN per ogni cliente. Lato MoonCloud si creano n Execution Cluster, uno per ciascun cliente, costituiti da un VPN server e almeno da un *Docker host*. Ciascun cluster è isolato, quindi i conflitti non hanno nessun impatto. Si è deciso di lasciare questa

strada per ultima, perché per quanto funzioni presenta un grosso inconveniente: farebbe aumentare di molti i costi. Più il numero di client aumenterebbe maggiore sarebbe il numero di VM per OpenVPN server da allocare, tanto più i costi salirebbero.

Ecco quindi il problema che si è dovuto risolvere: *come gestire la conflittualità tra gli indirizzi IP delle reti target senza dover allocare un server OpenVPN per ogni cliente?*

3.4.2 La soluzione

L'idea alla base della soluzione è quella di *mappare* ogni rete target su una nuova rete, stabilita da MoonCloud e garantita univoca. “Mappare” una rete significa trovare una nuovo NET ID per tale rete, e *spostare* gli indirizzi IP originali nel nuovo NET ID. Lato MoonCloud, i *probe* conoscono gli indirizzi IP modificati (garantiti univoci), ed il rimappaggio verso quelli originali viene effettuato sul device VPN client.

Prima di proseguire, si chiarisce meglio la terminologia che da qui in poi sarà utilizzata:

- “rete originale – OTN (Original Target Network)”: l'indirizzo IP di rete della rete target così come è in realtà
- “IP originale – OTI (Original Target IP)”: l'indirizzo IP di un host nella rete target così come è in realtà
- “rete mappata – MTN (Mapped Target Network)”: il nuovo NET ID assegnato ad una rete target
- “IP mappato – MTI (Mapped Target IP)”: l'indirizzo IP appartenente alla rete mappata a cui corrisponde un indirizzo IP originale
- “rete rimappata – RTN (Remapped Target Network)”: l'indirizzo IP di rete della rete target così come è in realtà, ovvero uguale alla rete originale
- “IP rimappato – RTI (Remapped Target IP)”: corrisponde all'IP originale.
- “mappare una rete”: assegnare alla rete originale una rete mappata
- “mappare un indirizzo IP”: assegnare un IP mappato ad un IP originale
- “rimappare una rete”: procedimento inverso del “mappare una rete”
- “rimappare un indirizzo IP”: procedimento inverso del “mappare un indirizzo IP”

Si definiscono quindi le seguenti funzioni *deterministiche* (con S corrispondente ad un certo server OpenVPN):

- $map_network : OTN, S \rightarrow MTN$, una funzione che data una OTN ritorna una MTN, garantita univoca per il server S
- $map_address : OTI, OTN, MTN, S \rightarrow MTI$, una funzione che dato in input:

- $OTI \mid OTI \in OTN$: un indirizzo IP originale appartenente alla rete originale
- OTN : la rete originale
- $MTN \mid map_network(OTN) = MTN$: la rete mappata della rete originale
- S : il server OpenVPN a cui OTN è assegnata

ritorni MTI : un indirizzo $\in MTN$ corrispondente a OTI .

- $remap_network : MTN, S \rightarrow OTN$, una funzione che data una rete mappata ritorna la corrispondente rete originale assegnata ad un certo server, con $OTN = RTN$.
- $remap_address : MTI, MTN, OTN, S \rightarrow OTI$, una funzione che dato in input:
 - $MTI \in MTN$: indirizzo IP mappato
 - $MTN \mid map_network(OTN) = MTN$: la rete OTN mappata
 - OTN : la rete originale
 - S il server OpenVPN a cui OTN è assegnata

ritorna OTI : un indirizzo $\in OTN$ corrispondente a MTN , e $RTI = OTI$

Per queste funzioni valgono le seguenti uguaglianze:

- $remap_network(map_network(OTN, S), S) = map_network(OTN, S)^{-1}$
- $remap_address(map_address(OTN, OTI, MTN, S), MTN, OTN, S) = map_address(OTN, OTI, MTN, S)^{-1}$

In altre parole, ogni funzione è l'inverso dell'altra.

Come effettuare il mappaggio? La funzione *map_network* deve essere per forza di cose effettuata dai VPN client, in modo che i server “vedano” sempre reti univoche. Non solo, questa tecnica di mapping deve rispettare ed integrarsi alla perfezione con il NAT *al contrario*, il cui utilizzo è imprescindibile. La soluzione implementativa è anche in questo caso iptables.

Si supponga di avere la seguente configurazione:

- rete target OTN : 192.168.100.0/24
- CommonName VPN client: client1
- rete mappata: $map_network(OTN, S) = 192.168.1.0./24$
- rete MoonCloud: 192.168.200.0/24
- indirizzo IP interno VPN server S : 192.168.200.20
- indirizzo IP pubblico VPN server: 100.4.78.5
- indirizzo IP del Docker host: 192.168.200.2

- indirizzo IP VPN client ($OTI \in OTN$): 192.168.100.50
- subnet VPN: 10.7.0.0/24
- indirizzo IP scheda di rete virtuale VPN server: 10.7.0.1
- indirizzo IP scheda di rete virtuale VPN client: 10.7.0.2
- CommonName del VPN client: client1
- target da analizzare ($OTI \in OTN$): 192.168.1.254
- target mappato: $MTI \in MTN = \text{map_address}(192.168.100.254, 192.168.100.0/24, 192.168.1.0/24) = 192.168.1.254$

Le reti mappate sostituiscono le reti originali nella configurazione delle rotte lato MoonCloud. Dall'estratto dei file `client-up.sh` e `client-down.sh` si può vedere infatti che le rotte aggiunte e rimosse sono quelle mappate.

```
# /etc/openvpn/server/cs/client-up.sh

#!/bin/bash

if [ "$common_name" == "client1" ]; then
    ip route add 192.168.1.0/24 via 10.7.0.1
    iptables -t nat -A POSTROUTING -d 192.168.1.0/24 -j
    ↪ MASQUERADE
fi

# /etc/openvpn/server/cs/client-down.sh

#!/bin/bash

if [ "$common_name" == "client1" ]; then
    ip route del 192.168.1.0/24 via 10.7.0.1
    iptables -t nat -D POSTROUTING -d 192.168.1.0/24 -j
    ↪ MASQUERADE
fi
```

Allo stesso modo, il file `client1` che contiene le direttive client-specific avrà il seguente contenuto:

```
iroute 192.168.1.0 255.255.255.0
```

Infine, per applicare la soluzione di NAT *al contrario*, sul device client sarà eseguito il comando `iptables`:

```
iptables -t nat -A POSTROUTING -d 192.168.100.0/24 -s
↪ 10.7.0.0/24 -j MASQUERADE
```

Si noti che in questo comando la rete di destinazione è la *rete originale*.

I passi eseguiti sono quindi i seguenti:

1. un cliente registra una nuova rete: $192.168.100.0/24$
2. MoonCloud sceglie a quale server S assegnare tale rete, in questo caso è il VPN server all'indirizzo IP $192.168.200.20$
3. MoonCloud mappa la rete in input: $MTN = map_network(192.168.100.0/24, S)$, il risultato è $192.168.1.0/24$
4. si crea un nuovo device client, propriamente configurato
5. il device client viene collegato alla rete target e si connette al server OpenVPN
6. si alloca un nuovo *Docker host*, nell'esempio in questione è $192.168.200.2$
7. il cliente configura una nuova analisi, specificando come target: $192.168.100.254$
8. il target di tale analisi passato ai *probe* è il risultato dell'applicazione di $map_address(192.168.100.254, 192.168.100.0/24, 192.168.1.0/24)$, ovvero $192.168.1.254$ (detto *MTI*)
9. il *probe* genera un pacchetto destinato a $192.168.1.254$, cioè *MTI*
10. il sistema operativo del *Docker host* ha configurato una rotta del tipo: $192.168.1.0/24$ via $192.168.200.20$, quindi il pacchetto viene inviato al server VPN
11. il sistema operativo del server S riceve il pacchetto, a sua volta ha configurato la rotta seguente: $192.168.1.0/24$ via $10.7.0.1$; tale rotta è stata configurata tramite il file di script `client-up.sh`.
12. A questo punto il pacchetto passa nell'hook di `POSTROUTING`, quindi si applica la regola di NAT descritta precedentemente: l'IP sorgente del pacchetto in questione è ora $10.7.0.1$
13. il pacchetto viene inviato all'interfaccia virtuale di OpenVPN, e da esso ricevuto
14. OpenVPN consulta la propria routing table interna, in conseguenza di ciò invia il pacchetto a `client1` lungo la connessione TCP con esso
15. il pacchetto viene ricevuto dal device client, l'indirizzo IP di destinazione è quello mappato, cioè $192.168.1.254$
16. il pacchetto viene scritto sull'interfaccia virtuale e ricevuto dal kernel del sistema operativo
17. iptables applica la funzione *remap_address* su $192.168.1.254$ ed ottiene $192.168.100.254$. Questo indirizzo diventa il nuovo IP di destinazione

18. a questo punto il pacchetto passa per l'hook di `POSTROUTING` e si applica il *NAT al contrario*, l'indirizzo IP sorgente è ora `192.168.100.50` (cioè l'IP del device client)
19. il pacchetto viene quindi inviato a `192.168.100.254`
20. `192.168.100.254` riceve il pacchetto, lo elabora, invia una risposta con destinazione `192.168.100.50`
21. il pacchetto viene ricevuto da `192.168.100.50` (`client1`), come prima cosa si riapplica l'inverso di *NAT al contrario*, modificando l'indirizzo IP destinazione in `10.7.0.1` (l'indirizzo IP sorgente del pacchetto di richiesta inviato dal server OpenVPN)
22. `iptables` applica `map_address` su `192.168.100.254`, il risultato è `192.168.1.254` e viene specificato come indirizzo IP sorgente. Il pacchetto ora è conforme a quello inviato da OpenVPN server dopo il *NAT lato server*, poiché l'indirizzo IP sorgente è quello mappato, cioè quello che MoonCloud conosce.
23. L'OS quindi inoltra il pacchetto alla scheda di rete virtuale OpenVPN, il quale lo riceve e lo invia al server
24. il server OpenVPN *S* riceve il pacchetto, lo decifra, lo scrive sulla scheda di rete virtuale
25. il sistema operativo del server *S* lo riceve, quindi riapplica il *NAT lato server*, l'indirizzo IP destinazione passa da `10.7.0.1` a `192.168.200.2`: a questo punto preciso *il pacchetto è esattamente la risposta precisa alla richiesta generata dal Docker host*.
26. Il pacchetto viene quindi inviato al *Docker host* e quindi al *probe*.

Non resta che spiegare *come* sono eseguite le funzioni di mappaggio e rimappaggio.

Lato MoonCloud, `map_network` è una funzione eseguita dal microservizio `MoonCloud_VPN` (si veda a partire da pagina 109). Per ora basti sapere che nel momento in cui avviene l'enrollment di un nuovo cliente, le sue reti sono mappate su nuove reti in modo che siano univoche.

Ogni volta che si specifica un target per l'analisi, il cliente inserisce l'indirizzo IP *vero* (*OTI*), quindi si contatta `MoonCloud_VPN` per ottenerne la sua versione mappata (*MTI*): tale indirizzo *MTI* è l'IP target dei *probe* che fanno analisi.

All'interno di MoonCloud, per ogni Execution Cluster si predispone una VM destinata ad essere il VPN server. Ogni cluster è isolato, pertanto è possibile che due server abbiano dei mapping in comune, grazie all'isolamento questo non crea problemi. Un server può gestire diversi clienti contemporaneamente, poiché l'univocità delle reti mappate è garantita *per-server*.

Per ciò che concerne `iptables`, supponendo di voler mappare e rimappare da `192.168.100.254` a `192.168.1.254`, con pacchetti provenienti dalla subnet `10.7.0.0/24`, è possibile utilizzare i seguenti due comandi:

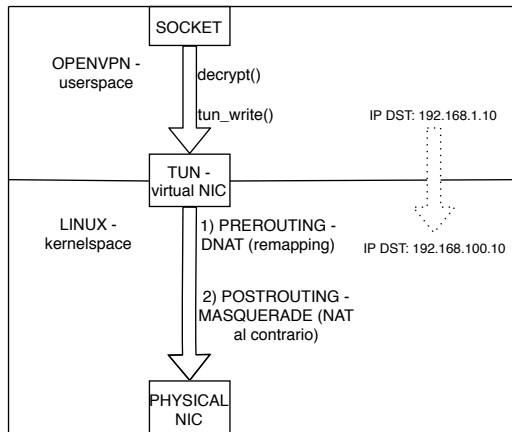


Figura 3.2: IP Mapping: MoonCloud → Target. Si mostra un esempio di ciò che accade nel VPN client quando si riceve un pacchetto tramite la VPN. Per essere rigorosi occorre notare che una volta che OpenVPN invia qualcosa su un socket il controllo passa di nuovo al sistema operativo che scrive quindi il pacchetto sulla scheda di rete fisica, ma questo non è di interesse per il problema in questione.

```
iptables -t nat -A PREROUTING -d 192.168.1.254 -s
↳ 10.7.0.0/24 -j DNAT --to-destination 192.168.100.254
iptables -t nat -A POSTROUTING -s 192.168.100.254 -d
↳ 10.7.0.0/24 -j SNAT --to-source 192.168.1.254
```

Il primo comando viene utilizzato per modificare l'indirizzo IP destinazione (DNAT `-to-destination`), da quello mappato noto a MoonCloud (*MTI*) a quello originale (*OTI*); il secondo per modificare l'IP sorgente, da *OTI* a *MTI* (SNAT `-to-source`). Il microservizio MoonCloud_VPN prepara un file contenente i comandi mostrati per tutti gli indirizzi IP che servono, esso viene poi eseguito sul client. La soluzione basata su iptables ha il vantaggio di integrarsi perfettamente con il NAT *al contrario* (poiché è eseguita dallo stesso software), e sfrutta la possibilità di un pacchetto di poter passare per più *hook* nel kernel Linux.

- Pacchetti MoonCloud → target:
 1. modifica IP destinazione (*hook* PREROUTING)
 2. modifica IP sorgente (MASQUERADE, *hook* POSTROUTING)
- Pacchetti target → MoonCloud:
 1. modifica IP destinazione (MASQUERADE, *hook* PREROUTING)
 2. modifca IP sorgente (*hook* POSTROUTING)

3.5 Recap

Prima di passare ad analizzare come tutte le soluzioni appena indicate si combinino tra loro, è utile fare un breve riassunto dei problemi affrontati e delle soluzioni attuate.



Figura 3.3: IP Mapping: Target → MoonCloud. In questo caso si mostra cosa succede con i pacchetti in risposta a richieste provenienti da MoonCloud lungo la VPN.

NAT al contrario I pacchetti provenienti dalla rete MoonCloud hanno come IP sorgente un IP appartenente a tale rete, affinché le risposte possano tornare indietro, occorre che in ciascuna rete target sia configurata la seguente rotta: *rete: rete-MoonCloud via: IP-client-VPN*. Essa può essere inserita nel default gateway di ciascuna rete oppure in ogni host di tali reti. Tuttavia, non è possibile intervenire sui dispositivi appena elencati, pertanto la soluzione è quella di applicare NAT ai pacchetti provenienti da MoonCloud e diretti alla rete target, quindi ai pacchetti in uscita dal device VPN client. In questo modo, i pacchetti hanno come indirizzo IP sorgente quello del device client, il quale si trova nella stessa rete degli host target, che quindi inviano ad esso le proprie risposte, senza bisogno di configurare alcuna rotta aggiuntiva,

Bypassing della direttiva “route ...” Lo scopo di tale direttiva, sia essa posta nel client o nel server, è quella di indicare quali reti sono raggiungibili mediante l’altro. Tuttavia, poiché OpenVPN legge il file di configurazione solo all’avvio, diventa un problema aggiungere nuovi client al server senza dover riavviarlo. L’effetto di questa direttiva è quello di aggiungere una nuova rotta nella routing table del sistema operativo così fatta: `<net> via <virtual NIC’s IP>`. Si sfrutta l’hook `client-connect` disponibile per OpenVPN server, che consente di eseguire un programma quando un client si connette. Il programma che si lancia è uno script Bash che esegue direttamente i comandi di aggiunta delle rotte sulla base del client che ha fatto scattare quell’hook. Le rotte sono rimosse in maniera analoga sfruttando l’hook `client-disconnect`. Quando si aggiunge un nuovo client è sufficiente aggiornare questi due script.

NAT lato server In OpenVPN client i pacchetti diretti alla scheda di rete virtuale sono risposte provenienti dagli host nella rete target, ed hanno come IP di destinazione un IP appartenente alla/e rete/i in cui si trovano i *Docker host*. Affinché OpenVPN sappia che tali reti siano raggiungibili tramite la VPN, è necessario che il server le annunci mediante delle rotte, e questo viene normalmente fatto mediante la direttiva `push "route <route-to-`

`advertise>`", il cui effetto è che il client aggiunga tale rotta alla routing table del kernel. Tuttavia, non si può sapere a priori quali reti saranno "dietro" il server, a tale scopo l'OS del server effettua del NAT sui pacchetti diretti alla scheda di rete virtuale OpenVPN, settando l'IP sorgente come l'IP della scheda di rete virtuale. Si ricorda che tutte le NIC virtuali di una stessa VPN stanno nella stessa subnet VPN, cioè hanno lo stesso NET ID. Spostandosi nel client, si ha che i pacchetti di risposta a MoonCloud hanno come IP destinazione quello virtuale del server, il quale si trova nella stessa subnet della NIC virtuale del client. Il sistema operativo sa quindi che deve inoltrare ad essa tali pacchetti. Questo perché quando si assegna un indirizzo IP ad una scheda di rete (virtuale in questo caso) si aggiunge automaticamente la seguente rotta alla routing table dell'OS: `<VPN-subnet> via <virtual NIC's IP>`.

IP mapping Per poter connettere tra di loro n reti mediante una VPN è necessario che ciascuna rete partecipante abbia un NET ID diverso. Poiché si vuole utilizzare un server per connettere diverse reti target di diversi clienti, è ragionevole presumere che vi sia prima o poi un conflitto, e che due reti abbiano lo stesso NET ID. Per superare questo problema è stato introdotto il nuovo concetto di *mappaggio delle reti/degli indirizzi IP*, per il quale MoonCloud assegna ad ogni rete un nuovo NET ID, e mappa gli IP originali nel nuovo NET ID. Questo mappaggio è garantito univoco. Lato client, si utilizza iptables per modificare gli header IP e rendere ai clienti questa complessa operazione del tutto trasparente.

3.6 Configurazione finale

Dopo aver visto tutti i problemi affrontati e come sono stati risolti, è il momento di vedere come sono configurati *davvero* i server ed i client VPN in MoonCloud. Come per il mappaggio degli indirizzi IP, il microservizio MoonCloud_VPN si occupa di automatizzare e di generare tutto ciò che serve.

Durante tutte le sottosezioni successive, si supporrà la seguente configurazione di esempio:

- rete target 1: 192.168.100.0/24 (cliente A)
- rete target 1 mappata: 192.168.1.0/24
- rete MoonCloud: 192.168.200.0/24
- indirizzo IP interno VPN server: 192.168.200.20
- CommonName e nome DNS del VPN server: `ovpn1.moon-cloud.eu`
- indirizzo IP del Docker host per client A: 192.168.200.2
- indirizzo IP VPN client A: 192.168.100.50
- subnet VPN: 10.7.0.0/24

- indirizzo IP scheda di rete virtuale VPN server: 10.7.0.1
- indirizzo IP scheda di rete virtuale VPN client A: 10.7.0.2
- CommonName del VPN client A: office1.company.com

Si tenga presente che ci si concentra sulla configurazione della VPN ed anche l'*IP mapping* viene affrontato solo dal punto di vista della VPN. Per avere ulteriori informazioni sulla generazione dei certificati, sull'algoritmo che mappa una rete o che mappa un IP, il capitolo 6 è dedicato ad esso. Nei file `client-up.sh` e `client-down.sh` si noteranno alcune regole iptables che non state ancora spiegate: esse sono funzionali ad incrementare la sicurezza della VPN, e sono descritte nel prossimo capitolo.

3.6.1 Configurazione del server

Al momento della creazione di un nuovo server, viene generato un file di configurazione simile a quello mostrato di seguito.

```
# /etc/openvpn/ovpn1.conf

# ruolo
mode server
tls-server

# protocollo L4
proto tcp

# configurazione NIC
# virtuale
dev-type tun
dev ovpn-1

persist-tun
persist-key

script-security 2

# porta di ascolto 443
port 443

# VPN subnet
server 10.7.0.0 255.255.255.0

topology subnet

# path per client-specific file
client-config-dir /etc/openvpn/ovpn1/ccd
```

```

# TLS config
remote-cert-eku "TLS Web Client Authentication"
tls-version-min 1.2

tls-cipher TLS-ECDHE-ECDSA-WITH-AES-256-GCM-SHA384
cipher AES-256-GCM

# chiavi
ca /etc/openvpn/certs/ca.crt
key /etc/openvpn/ovpn1/certs/ovpn1.key
cert /etc/openvpn/ovpn1/certs/ovpn1.crt

# per ECDH
dh none

# nuove chiavi ogni 20 minuti
reneg-sec 1200

# log config
log /var/log/openvpn/ovpn1/openvpn.log
verb 4
status /var/log/openvpn/ovpn1/openvpn-status.log

# livello di sicurezza per comandi user-defined
script-security-level 2

# scripts
client-connect /etc/openvpn/ovpn1/cs/client-up.sh
client-disconnect /etc/openvpn/ovpn1/cs/client-down.sh

# opzioni 'ping'
keepalive 10 60

```

Il file mostrato sopra verrà posizionato in `/etc/openvpn/ovpn1.conf`, ed ovviamente tutti i percorsi indicati in questo file devono esistere.

I file `/etc/openvpn/ovpn1/cs/client-up.sh` e `/etc/openvpn/ovpn1/cs/client-down.sh`:

```

# /etc/openvpn/ovpn1/cs/client-up.sh

#!/bin/bash

if [ "$common_name" == "officel.company.org" ]; then
    ip route add 192.168.1.0/24 via 10.7.0.1
    iptables -t nat -A POSTROUTING -d 192.168.1.0/24 -j
    ↪ MASQUERADE

# non fondamentali, verranno spigete in seguito.

```

```

iptables -t filter -I OUTPUT -d 192.168.1.0/24 -o ovpn+
↪ -m state --state NEW,RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
iptables -t filter -I INPUT -s 192.168.1.0/24 -i ovpn+ -m
↪ state --state RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
iptables -t filter -I FORWARD -s 192.168.1.0/24 -i ovpn+
↪ -m state --state RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
fi

# /etc/openvpn/ovpn1/cs/client-down.sh

#!/bin/bash

if [ "$common_name" == "officel.company.org" ]; then
    ip route add 192.168.1.0/24 via 10.7.0.1
    iptables -t nat -D POSTROUTING -d 192.168.1.0/24 -j
    ↪ MASQUERADE

    # verranno spiegate in seguito
    iptables -t filter -D OUTPUT -d 192.168.1.0/24 -o ovpn+
    ↪ -m state --state NEW,RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
    iptables -t filter -D INPUT -s 192.168.1.0/24 -i ovpn+ -m
    ↪ state --state RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
    iptables -t filter -D FORWARD -s 192.168.1.0/24 -i ovpn+
    ↪ -m state --state RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
fi

```

Il file `/etc/openvpn/ovpn1/ccd/officel.company.org:`

```
iroute 192.168.1.0 255.255.255.0
```

3.6.2 Configurazione del client

Il file di configurazione del client si presenta come di seguito.

```

# /etc/openvpn/officel.conf

client

# protocollo L4
proto tcp

# nome server e porta
remote ovpn1.moon-cloud.eu 443

verify-x509-name ovpn1.moon-cloud.eu name

# configurazione NIC
# virtuale

```

```

dev-type tun
dev ovpn-officel

persist-tun
persist-key

group nogroup
user nobody

# TLS configuration
remote-cert-eku "TLS Web Server Authentication"
tls-version-min 1.2
tls-cipher TLS-ECDHE-ECDSA-WITH-AES-256-GCM-SHA384
cipher AES-256-GCM

# chiavi e certificati
ca /etc/openvpn/certs/ca.crt
key /etc/openvpn/officel/certs/officel.key
cert /etc/openvpn/officel/certs/officel.crt

# log config
log /var/log/openvpn/officel/openvpn.log
verb 4
status /var/log/openvpn/officel/openvpn-status.log

```

Si possono osservare le seguenti differenze rispetto al server:

- mancanza della direttiva “`topology subnet`” poiché è riservata al server
- mancanza della direttiva “`client-config-dir`” per la stessa ragione
- mancanza delle direttive “`client-connect`” e “`client-disconnect`” per la stessa ragione
- aggiunta della direttiva “`remote`” che indica come raggiungere il server
- aggiunta delle direttive “`user nobody`” e “`group nogroup`” che consentono di fare il downgrade dei privilegi. Non è possibile farlo sul server poiché è necessario che abbia privilegi amministrativi per eseguire i comandi contenuti negli script di connessione e disconnessione dei client.

Si è supposto di mappare `192.168.100.0/24` in `192.168.1.0/24`, ed ogni IP della rete originale viene mappato nella nuova rete nel seguente modo: `192.168.100.1 ↔ 192.168.1.1`, e così via fino a `192.168.100.254 ↔ 192.168.1.254`. Si produce quindi uno script di comandi per iptables così composto:

```

#!/bin/bash

# ip mapping, modifica destinazione
iptables -t nat -A PREROUTING -d 192.168.1.1 -s 10.7.0.0/24
↪ -j DNAT --to-destination 192.168.100.1

```

```

iptables -t nat -A PREROUTING -d 192.168.1.2 -s 10.7.0.0/24
↳ -j DNAT --to-destination 192.168.100.2
iptables -t nat -A PREROUTING -d 192.168.1.3 -s 10.7.0.0/24
↳ -j DNAT --to-destination 192.168.100.3
# ...
iptables -t nat -A PREROUTING -d 192.168.1.254 -s
↳ 10.7.0.0/24 -j DNAT --to-destination 192.168.100.254

# NAT al contrario
iptables -t nat -A POSTROUTING -d 192.168.1.0/24 -s
↳ 10.7.0.0/24 -j MASQUERADE

# ip mapping, modifica sorgente
iptables -t nat -A POSTROUTING -s 192.168.100.1 -d
↳ 10.7.0.0/24 -j SNAT --to-source 192.168.1.1
iptables -t nat -A POSTROUTING -s 192.168.100.2 -d
↳ 10.7.0.0/24 -j SNAT --to-source 192.168.1.2
iptables -t nat -A POSTROUTING -s 192.168.100.3 -d
↳ 10.7.0.0/24 -j SNAT --to-source 192.168.1.3
# ...
iptables -t nat -A POSTROUTING -s 192.168.100.254 -d
↳ 10.7.0.0/24 -j SNAT --to-source 192.168.1.254

```

3.7 Testing

Si passa a descrivere i due test che sono stati effettuati per verificare che il funzionamento di OpenVPN.

3.7.1 Test 1

Il primo test è stato eseguito sulla configurazione spiegata all’inizio del capitolo:

- OpenVPN server ospitato su AWS, raggiungibile da nome DNS, sistema operativo Ubuntu Server, indirizzo IP privato 172.31.40.221⁹
- Docker host ospitato su AWS, nella stessa rete privata del server, sistema operativo Ubuntu Server, indirizzo IP privato 172.31.43.141
- due reti virtuali, create con VirtualBox:
 - rete 1, detta net50, costituita da:
 - * firewall stateful, NAT verso l’esterno e traffico consentito solo sulle porte 80, 443 TCP e 53 UDP, indirizzo IP 192.168.100.254, sistema operativo Alpine Linux¹⁰
 - * client VPN, sistema operativo Ubuntu desktop, indirizzo IP 192.168.100.20, default gateway 192.168.100.254

⁹<https://www.ubuntu.com/>

¹⁰<https://www.alpinelinux.org/>

- * due host Alpine Linux, indirizzi IP rispettivamente 192.168.100.30 e 192.168.100.40, entrambi con un server web in ascolto sulla porta 80
- rete 2, detta net200, costituita da:
 - * firewall stringente, configurato analogamente a quello dell'altra rete
 - * client VPN, sistema operativo Ubuntu desktop, indirizzo IP 192.168.100.20, default gateway 192.168.100.254
 - * un host Alpine Linux, con indirizzo IP 192.168.100.30 ed un server web in ascolto sulla porta 80¹¹

Le due reti sono state appositamente scelte con NET ID uguali per testare il funzionamento dell'*IP Mapping*. In particolare:

- net50 è stata mappata su 192.168.50.0/24
 - 192.168.100.30 ↔ 192.168.50.30
 - 192.168.100.40 ↔ 192.168.50.40
- net200 è stata mappata su 192.168.200.0/24
 - 192.168.100.30 ↔ 192.168.200.30

La figure 3.4 dà una rappresentazione grafica della topologia realizzata.

I due firewall sono stati configurati volutamente in modo restrittivo, al fine di verificare se OpenVPN fosse stato in grado di passarli.

Una volta messa a punto la connessione, l'obiettivo del test era riuscire a visualizzare le pagine web offerte dai target dal *Docker host*. Per far sì che il *Docker host* possa raggiungere i target, è necessario configurare la routing table del suo kernel per instradare i pacchetti destinati ai target al VPN server. L'indirizzo IP di tale server è 172.31.40.221, per cui si sono eseguiti i seguenti due comandi sul *Docker host*:

```
ip route add 192.168.50.0/24 via 172.31.40.221
ip route add 192.168.200.0/24 via 172.31.40.221
```

Mentre con SoftEther non si era nemmeno riusciti a completare la connessione, la figura 3.5 mostra che la soluzione funziona. Si tratta della shell dell'autore connessa in SSH al *Docker host* sul quale è in esecuzione un container Alpine.

3.7.2 Test 2

Il secondo test è stato eseguito interamente su macchine virtuali messe a disposizione dal SESAR Lab. Per brevità, non si riporta di nuovo la configurazione dettagliata del test, poiché a parte gli indirizzi IP che in sé sono diversi, il setup è stato di fatto lo stesso. L'unica differenza è che si è usata una sola rete target anziché due. L'obiettivo era testare una connessione SSH dalla *Docker machine* collegata al VPN server verso un host nella rete target (passando ovviamente per la VPN). Il test ha dato esito positivo, lo schema è mostrato figura 3.6.

¹¹Non si è creato un secondo host anche in questa rete perché il carico di lavoro sul PC utilizzato

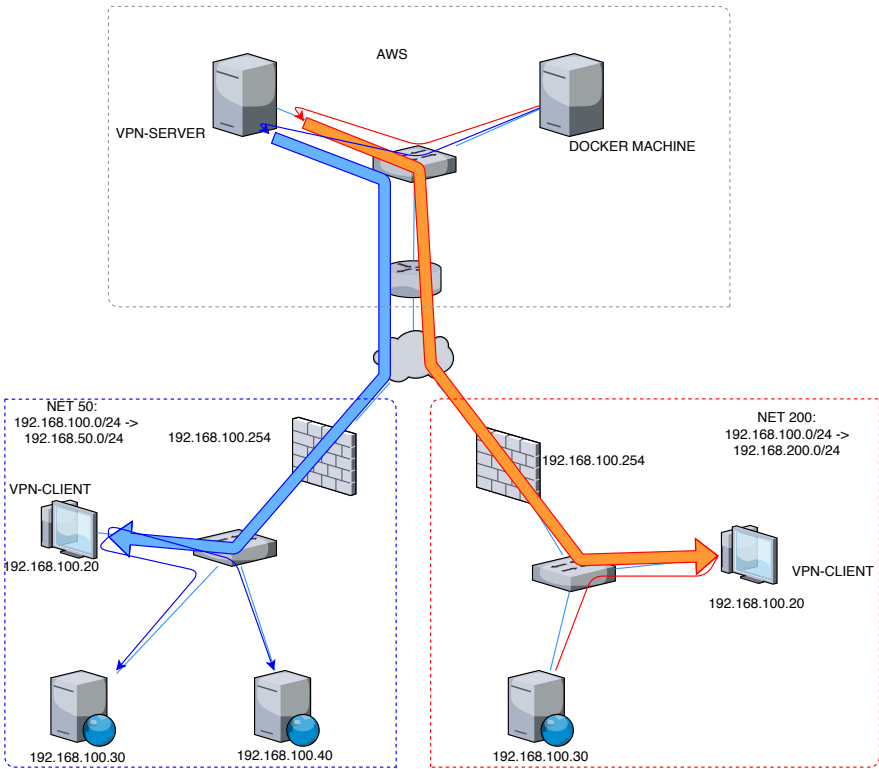


Figura 3.4: Test 1 per OpenVPN

iniziava ad essere elevato.

```
ubuntu@ip-172-31-43-141:~  
+ Tesi3: make mooncloud_vpn: git ftp: openvpn Downloads: apt PMDSProject: make ...172-31-43-141: ~  
OK: 4 MiB in 11 packages  
(1/4) Installing ca-certificates (20171114-r0)  
(2/4) Installing libssh2 (1.8.0-r2)  
(3/4) Installing libcurl (7.59.0-r0)  
(4/4) Installing curl (7.59.0-r0)  
Executing busybox-1.27.2-r8.trigger  
Executing ca-certificates-20171114-r0.trigger  
OK: 6 MiB in 15 packages  
/ # curl 192.168.50.30  
<html>  
<body>  
Hello there, this is mini_http  
on 192.168.100.30 but you  
are seeing me on 192.168.50.30  
</body>  
</html>  
/ # curl 192.168.50.40  
<html>  
<body>  
Hello there, this is mini_http  
on 192.168.100.40 but you  
are seeing me on 192.168.50.40  
</body>  
</html>  
/ # curl 192.168.200.30  
<html>  
<body>  
Hello there, this is mini_http  
on 192.168.100.30 but you  
are seeing me on 192.168.200.30  
</body>  
</html>  
/ #
```

Figura 3.5: Il risultato dell'esecuzione del test

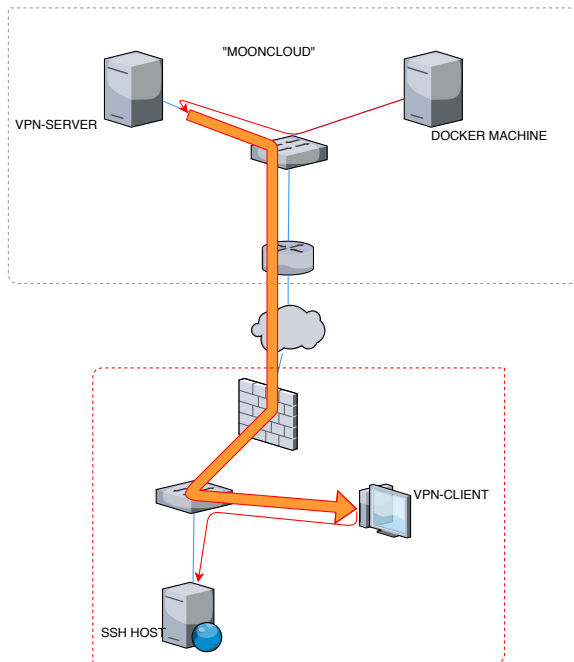


Figura 3.6: Test 2 per OpenVPN

Capitolo 4

nftables

`nftables`¹ è la soluzione di nuova generazione per il firewalling in Linux, il cui intento è quello di sostituire iptables. In questo capitolo si analizza come funziona nftables, come e perché è migliore del suo predecessore, e soprattutto, come si è passati da iptables a nftables sia lato server sia lato client.

4.1 Prerequisiti

Prima di spiegare nftables si procede ad introdurre in maniera rigorosa iptables, questo consentirà di comprendere meglio come mai nftables sia superiore.

netfilter *netfilter* è il componente del kernel Linux che “enables packet filtering, network address [and port] translation (NA[P]T) and other packet mangling”, il quale viene utilizzato mediante il popolare programma iptables (ed *ip6tables*, *arptables*, *ebtables*)². Si tratta di uno strumento molto potente, che consente a qualsiasi dispositivo supportato dal kernel Linux di diventare un firewall (o di compiere praticamente qualsiasi altra operazione sui pacchetti in transito).

Sia netfilter sia iptables si scrivono senza maiuscole.

netfilter è composto da una serie di *hook* a cui è possibile registrare delle *callback* che sono chiamate ogni volta che un pacchetto passa per un certo hook. [9] Un pacchetto che entra in contatto con lo stack di rete di Linux transita per diverse parti di esso in diversi momenti; un hook non è un altro che un *punto* dello stack in cui il pacchetto passa. L'intero stack di rete offre numerosi hook, e non tutti sono disponibili in netfilter. In particolare, quelli disponibili sono:

- `NF_IP_PREROUTING`, raggiunto da tutti i pacchetti appena entrano nello stack di rete, la decisione di routing deve ancora essere presa.
- `NF_IP_LOCAL`, per i pacchetti dopo che sono stati *routed* dal sistema e destinati al sistema locale.
- `NF_IP_FORWARD`: dopo che si è presa la decisione di routing, per pacchetti *in transito* ad un altro sistema.

¹<https://netfilter.org/projects/nftables/index.html>

²<https://netfilter.org/index.html>



Figura 4.1: Gli hook di netfilter *classici*. Tutti i pacchetti in arrivo passano per PREROUTING, viceversa quelli in uscita devono passare per forza per POSTROUTING. https://wiki.nftables.org/wiki-nftables/index.php/Netfilter_hooks

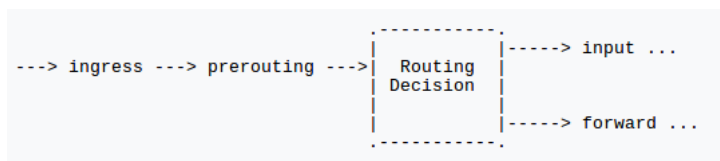


Figura 4.2: Hook INGRESS di Netfilter. E' l'hook che viene prima di tutti gli altri. https://wiki.nftables.org/wiki-nftables/index.php/Netfilter_hooks

- `NF_IP_LOCAL_OUT`: pacchetti creati localmente e destinati ad altri sistemi (quindi viene dopo la decisione di routing).
- `NF_IP_POSTROUTING`, raggiunto da tutto i pacchetti dopo che sono stati *routed* e stanno per uscire dal sistema.
- `NF_IP_INGRESS` è un hook disponibile nelle versioni più recenti di Linux, avviene prima di `NF_IP_PREROUTING` per pacchetti in ingresso. E' utile per il cosiddetto "*early packet dropping*"[46].

iptables iptables è uno dei programmi *userspace* usati per registrare degli hook in netfilter e specificare quale azioni devono essere eseguite. Ciò che tipicamente si scrive mediante iptables sono delle *regole*, esse sono organizzate in *tabelle*, le quali a loro volta sono costituite da *chain*. Esistono delle tabelle predefinite:

- `filter`: utilizzata per definire regole di firewalling
- `mangle`: usata per generiche modifiche ai pacchetti
- `nat`: utilizzata la traduzione NAT/PAT
- `raw`: utilizzata principalmente per operare sui pacchetti senza il tracking della connessione (più veloce)
- `security`: per distribuzioni che sfruttano SELinux

E' possibile definire delle tabelle ulteriori. Le chain predefinite sono:

- `FORWARD` per pacchetti che passano attraverso il sistema

- INPUT per i pacchetti ricevuti e destinati al sistema locale
- OUTPUT: pacchetti generati dal sistema in uscita da esso
- PREROUTING per operare su pacchetti appena arrivano nello stack di rete
- POSTROUTING per lavorare su pacchetti quando stanno per uscire dal sistema.

Non tutte le tabelle hanno a disposizione tutte le chain, ad esempio nella tabella di `nat` vi sono PREROUTING e POSTROUTING, mentre in `filter` è possibile usare INPUT, FORWARD, OUTPUT.

Come si può dedurre dal nome delle chain, esse corrispondono agli hook di netfilter:

| Hook | Chain |
|-------------------|-------------|
| NF_IP_PREROUTING | PREROUTING |
| NF_IP_LOCAL | INPUT |
| NF_IP_FORWARD | FORWARD |
| NF_IP_LOCAL_OUT | OUTPUT |
| NF_IP_POSTROUTING | POSTROUTING |

Tabella 4.1: La corrispondenza tra gli hook di netfilter e le chain di iptables; si può notare come non sia possibile usare l'hook NF_IP_INGRESS perché non disponibile in iptables.

Regole Le regole iptables sono composte da due parti: una parte detta di *match* nella quale si specificano i criteri per cui un pacchetto matcha o meno una regola, ed una seconda di *target* (indicato con l'opzione `-j`) che specifica quale azione compiere per quel pacchetto se vi è matching. Alcune tra i target disponibili sono:

- ACCEPT per accettare il pacchetto
- DROP per dropare il pacchetto, eliminandolo ed impedendo che prosegua nel suo attraversamento del kernel
- REJECT per dropare il pacchetto inviando un pacchetto ICMP al mittente
- DNAT per la traduzione NAT/PAT modificando l'indirizzo IP/porta destinazione
- SNAT per la traduzione NAT/PAT dell'indirizzo/porta sorgente.

Un'importante funzionalità offerta da netfilter è il tracking della connessione in una tabella di stato (nota come "*Connection Tracking*"), che è la base per il NAT e stateful firewalling.

Infine, sono disponibili numerose estensioni sia per matching sia per target; ad esempio, esiste una versione di iptables (*iptables L7*) che aggiunge comprensione

anche dei protocolli applicativi³. iptables viene usato con il protocollo IP versione 4 (e protocolli di livello superiore che si appoggiano ad IPv4), se si vuole lavorare con protocolli di livello 3 diversi, o protocolli di livello inferiore vi sono:

- `arptables`: manipolazione di pacchetti ARP
- `ebtables` per lavorare con frame Ethernet
- `ip6tables` per pacchetti che usano IPv6 come protocollo di rete.

4.2 Criticità

Ogni volta che si invoca un comando in *userspace* per modificare il set di regole, tale programma ottiene dal kernel il *blob* di *tutte* le regole, vi applica le modifiche, invia la versione modificata al kernel. Questo porta a numerosi problemi, tra cui il fatto che più il numero di regole aumenta, più la modifica delle regole è lenta. Si vorrebbe un'aggiunta delle regole in batch ed *atomica*, che sia al contempo più veloce ed affidabile.

Ci sono vari altri problemi con iptables che negli anni sono emersi, e la maggior parte di essi non sono attualmente risolvibili se non con un grosso cambio a livello progettuale, cambio che non è possibile perché richiederebbe dei *breaking changes*, e vista la vasta diffusione di iptables questo non è possibile. Alcuni dei problemi sono:

Duplicazione del codice Per ogni protocollo gestito da iptables (o sue controparti), occorre che vi sia comprensione di esso sia a livello utente (perché il programma in *userspace* deve creare il *blob* per il kernel), sia a livello di *kernel space*, per operare correttamente sul pacchetto secondo quanto specificato dall'utente.

Ciò significa che *per ogni nuovo protocollo*, esso deve essere supportato sia in *userspace* sia in *kernel space*.

Target multipli Si supponga che si voglia loggare un pacchetto e dropparlo, in una sola regola non è possibile, è necessario, ad esempio, creare una nuova tabella.

Matching avanzato Se non si usano estensioni per ogni match si può specificare un solo valore per un certo campo. Ad esempio si può definire un match che controlli sia la porta TCP mittente sia quella del destinatario, ma comunque si deve specificare *un solo* valore con cui fare match, *solo* una porta mittente e *solo* una destinatario. Quindi, se si vuole scrivere una regola che abiliti il traffico in entrata verso le porte 80 e 443 bisogna scrivere due regole, poiché vi sono due valori per uno stesso campo.

Multipli programmi Un'altra criticità è il fatto che vi sono 4 programmi *userspace* diversi, particolarmente problematica è la gestione separata di IPv4 e IPv6.

³<http://l7-filter.clearos.com/start>

Scalabilità Come si comporta iptables/netfilter quando vi sono davvero molte regole (centinaia o più) regole da gestire ed il throughput è elevatissimo? La risposta è purtroppo semplice, iptables non scala, a causa del suo design che prevede l'attraversamento delle varie regole.

Questi problemi hanno portato gli sviluppatori di netfilter ad introdurre una nuova soluzione, molto più avanzata [50].

4.3 nftables

Esso utilizza un approccio completamente diverso rispetto ai predecessori: una *in-kernel virtual machine* per il packet matching, concettualmente simile a BPF – Berkeley Packet Filter. Vi è un unico programma in *userspace* chiamato `nft`, il quale traduce in bytecode i comandi inseriti dall'utente e li *inietta* nel kernel (mediante `Netlink`⁴). Un elenco delle principali novità:

- Il kernel non ha più conoscenza specifica dei protocolli di rete per il match: per la VM matchare con una porta TCP o un flag dell'header Ethernet si traduce in semplici istruzioni come: *carica x byte del pacchetto nel registro z a partire dall'offset y*. Questo significa che è molto facile estendere nftables con nuovi protocolli, e che il codice del kernel è molto più semplice.
- Le regole possono avere più target per volta.
- Il programma `nft` diventa l'unico programma per la gestione delle regole, rimpiazzando iptables, ip6tables, arptables, ebtables.
- L'aggiunta, l'aggiornamento, la cancellazione ed ogni altra operazione sulle regole viene ora fatta in maniera atomica. Ciò significa che ogni volta che si fa un'operazione, anche su più regole, essa va a buon fine (cioè i suoi effetti sono applicati) solo se ogni singola operazione va a buon fine. Inoltre, sono svolte in maniera molto veloce.
- Possibilità di gestire contemporaneamente IPv4 ed IPv6 in una singola *tabela/chain*.
- Supporto a strutture dati avanzate basate su *set* che consentono un *matching/targeting* molto veloce.
- La sintassi delle regole cambia e diventa più simile al parlato.
- Non ci sono tabelle e chain di default.

La maggior parte dell'*intelligenza* è spostata su `nft`, il quale compila le regole ricevute in input e le passa al kernel, esso è anche responsabile di decompilare il bytecode presente nel kernel per presentarlo all'utente in un formato *human-readable*.

⁴`Netlink` è un meccanismo IPC – Inter-Process Communication del kernel Linux che consente di comandare e ottenere informazioni riguardo lo stack di rete, è una interfaccia che offre API basate su socket [28].

Vi sono due tipi di sintassi supportate: il primo è una sintassi assimilabile a quella di iptables dove si scrive una regola per volta. Il secondo tipo è invece una sintassi *strutturata* più simile a quella usata in file di configurazione. Saranno mostrati esempi di entrambe.

Tabelle e chain Si è detto che non esistono tabelle di default, quindi è spetta all'utente il compito di crearle. In nftables, ogni tabella ha una certa *famiglia*:

- `ip` è la famiglia per operare su pacchetti dal livello 3 in su e che usano IPv4 come protocollo di rete; è la famiglia di default se non è specificata.
- `ip6` è la famiglia per operare con pacchetti di protocolli che utilizzano il protocollo IPv6
- `inet` è la famiglia che consente di lavorare con pacchetti sia IPv4 sia IPv6
- `arp` viene utilizzata per processare pacchetti ARP
- `bridge` è usata per lavorare con frame Ethernet
- `netdev` consente di *attaccarsi* direttamente ad una interfaccia di rete.

Le tabelle sono solo dei contenitori vuoti il cui nome non ha alcuna semantica, contrariamente ad iptables. Comunque, la scelta della famiglia influenza quali hook possono essere utilizzati (es: l'hook `ingress` è disponibile solo per `netdev`) [47].

Le tabelle a loro volta racchiudono delle chain, ed anche in questo caso non vi sono delle chain predefinite ma occorre crearle [43]. Quando si crea una chain occorre specificare almeno tre cose:

- tipo; le scelte possibili sono:
 - `filter` da utilizzare quando si vuole fare del filtraggio
 - `nat` per utilizzare le funzionalità NAT
 - `route` per fare generico *packet mangling* che non sia NAT
- hook, in questo caso le scelte possibili sono gli hook già visti, cambia solo il fatto che vengono scritti in minuscolo.
- priorità: espressa con un numero, si tratta di una priorità *inversa*, più è bassa più il suo valore è alto; indica l'ordine con cui alcune operazioni sono svolte. Un *buon* valore è 0.

Quando si crea una nuova chain è possibile specificare la policy di default, cioè l'azione da compiere se non si matcha nessun'altra regola; il valore di default è `accept` (accettazione il pacchetto), altri valori possibili sono: `drop`, `queue`, `continue`, `return`.

4.3.1 Set e altre strutture dati

nftables introduce tre strutture dati pensate per indirizzare i problemi presenti in iptables (e sue controparti):

- matching limitato, per cui è problematico specificare più di una porta o più di un singolo indirizzo IP in una regola; il che porta a:
- elevato numero di regole a causa della suddetta limitazione, con conseguente diminuzione delle performance a causa del loro attraversamento lineare. Aniché usare n regole, se ne usa solo una con una struttura dati da n elementi.

E' possibile dichiararle in due modi:

- *anonymous*: vengono create ed istanziate all'interno di una regola e sono immutabili, non è possibile modificarle dopo la loro creazione.
- *Named*: sono vere e proprie variabili che vivono nello *scope* della tabella in cui sono definite. Una volta create è possibile modificarle in seguito. Per riferirsi ad una variabile, occorre preporre @ al nome della variabile.

L'idea principale dietro queste strutture è quella di poter ridurre drasticamente il numero di regole necessarie, quindi di aumentare le prestazioni. Migliorie che si sono dimostrate efficaci; per una dettagliata comparazione delle performance tra iptables e nftables si veda [10].

Set

La struttura dati base di nftables si chiama *Set*, ed è implementata utilizzando alberi rosso-neri, tabelle di hash oppure bitmap [49]. Un *Set* è, come dice il nome, un insieme di elementi di un certo *tipo*, esso può essere un tipo *base* predefinito come `ipv4_addr` o `inet_service` (numero di porta di protocolli L4), oppure un tipo complesso *composto* da altri tipi, ad esempio un nuovo tipo `ipv4_port`. Quando si crea una nuova struttura dati è possibile specificare vari parametri, tra cui una *policy*: per cosa deve essere ottimizzata la struttura? I valori possibili sono `performance` o `memory`.

I *Set* sono utilizzati per:

- fare match su più elementi in un unico regola, ad esempio, se si vogliono bloccare connessioni da 10 indirizzi IP diversi, è possibile definire un set che contenga questi 10 IP, anziché scrivere 10 regole diverse. Si consideri che i set sono molto performanti.
- Essere la struttura dati base su cui nftables ne costruisce ulteriori.

Map

Le *Map* sono costruite sui *Set*, possono essere viste come dei set in cui ciascun elemento è composto da due parti: la prima è la *chiave*, la seconda è il *valore* associato alla chiave [45]. Esse si comportano effettivamente come una mappa poiché

definiscono un *mappaggio* tra la chiave ed il valore, e sono utilizzati in contesti in cui si *trasforma* un input in un certo output secondo il mappaggio definito in questa struttura dati. Si può forse intuire l'utilizzo delle map nel mappaggio delle reti...

In particolare, le *Map* sono molto utili con target di tipo *dnat* ed *snat*. Si supponga che si voglia modificare l'indirizzo IP destinazione da 192.168.1.0/24 nel corrispondente indirizzo in 192.168.100.0/24 (mantenendo lo stesso offset) in PREROUTING, ed il viceversa in POSTROUTING. Farlo in iptables richiede 508 regole, 254 per ogni indirizzo in POSTROUTING e 254 per ogni indirizzo in POSTROUTING. Con nftables lo si può fare usando solo due regole e due mappe. Si può trovare un esempio alla fine del capitolo.

Dictionary

La struttura dati *Dictionary*, a volte nota anche come *vmap* – *verdict map*, è concettualmente molto simile alle *Map*, tuttavia gli elementi di questo insieme sono nelle forma: `key: verdict`, dove *verdict* indica l'azione (es: *accept*, *drop*) da applicare nel momento in cui si la chiave viene matchata [44].

Esempi Di seguito si riportano degli esempi che mostrano il funzionamento di nftables. Si noti in particolare come, nelle ultime quattro regole l'utilizzo dei *Set* consenta di specificare match multipli in un'unica regola, quindi di diminuire il numero complessivo di regole da attraversare.

Supponendo che ciò che si vede listato qui sotto sia il contenuto di un file, si può notare lo shebang all'inizio, in modo che sia eseguito da *nft* nella modalità nativa di shell che offre: tutte queste regole sono inserite atomicamente in una transazione. Invocando questi comandi in una shell normale invece si perderebbe l'atomicità perché ciascun comando è una invocazione separata al programma *nft* (si noti che qui tutte le regole non sono appunto prefisse da "*nft*") [48].

```
#!/usr/sbin/nft -f

# creazione della tabella, sia IPv4 sia IPv6
# chiamata 'filter'
add table inet filter

# aggiunta chain 'input'
add chain inet filter input { type filter hook input priority 0; \
policy drop;}

# chain 'output'
add chain inet filter output { type filter hook output priority 0; \
policy drop;}

# consentire il traffico in entrata sulla porta 22 in modo stateful
add rule inet filter input tcp dport 22 ct state\
new, related, established accept
```



```

# consentire le risposte
add rule inet filter output tcp sport 22 ct state \
related, established accept

# consentire tutto il traffico in uscita sulle
# porte 80 e 443 usando un set
add rule inet filter output tcp dport { 80, 443 } ct state \
new, related, established accept

# consentire le risposte
add rule inet filter input tcp sport { 80, 443 } ct state \
related, established accept

# creazione di un set chiamato 'allowed'

add set filter allowed { type: ipv4_addr }
add element filter allowed {
    192.168.1.20,
    192.168.2.20,
    192.168.100.1,
    192.168.200.254,
    10.7.0.20
}

# consentire tutte le connessioni in entrata dagli IP
# elencati sulla porta 8080
add rule inet filter input ip saddr @allowed tcp dport 8080 \
ct state {new, related, established } accept
# consentire le risposte
add rule inet filter output ip daddr @allowed tcp sport 8080 \
ct state {related, established }accept

```

E' possibile ottenere lo stesso risultato usando una sintassi *strutturata*:

```

#!/usr/sbin/nft -f
table inet filter {
    set allowed {
        type ipv4_addr
        elements = {
            192.168.1.20,
            192.168.2.20,
            192.168.100.1,
            192.168.200.254,
            10.7.0.20
        }
    }

    chain input {

```

```

type inet hook input priority 0; policy drop;
tcp dport 22 ct state new, related, established accept
tcp sport {80, 443} ct state {related, established accept
ip saddr @allowed tcp dport 8080 ct state new, related,
    established accept
}

chain output {
type inet hook output priority 0; policy drop;
tcp sport 22 ct state related, established accept
tcp dport {80, 443} ct state new, related, established accept
ip daddr @allowed tcp sport 8080 ct state related,
    established accept
}
}

```

Per ottenere la lista delle regole attive, è disponibile il comando `nft list ruleset`, che produce un output nello stesso formato *strutturato* appena mostrato.

L'esempio seguente si concentra invece sull'utilizzo dei dizionari. Si supponga di dover gestire una serie di regole relative alla porta destinazione 22:

- consentito dalle reti 192.168.100.0/24, 192.168.101.0/24, 192.168.200.0/24
- proveniente dalla rete 192.168.1.0/24 occorre fare REJECT
- tutto il resto del traffico verso tale porta non è consentito.

```

iptables -t filter -A INPUT -p tcp --dport 22 -s
↳ 192.168.100.0/24 -j ACCEPT
iptables -t filter -A INPUT -p tcp --dport 22 -s
↳ 192.168.101.0/24 -j ACCEPT
iptables -t filter -A INPUT -p tcp --dport 22 -s
↳ 192.168.200.0/24 -j ACCEPT

iptables -t filter -A INPUT -p tcp --dport 22 -s
↳ 192.168.1.0/24 -j REJECT
iptables -t filter -A INPUT -p tcp --dport 22 -j DROP

```

per brevità le regole in OUTPUT sono omesse

Mentre con `nftables`:

```

#!/usr/sbin/nft -f

# supponendo tabelle e chain già create
# aggiunta di 'dict' alla tabella filter
add map filter dict { type ipv4_addr: verdict; }

add element filter dict { 192.168.100.0/24: accept, \

```

```

192.168.101.0/24: accept, \
192.168.200.0/24: accept, \
192.168.1.0/24: reject }

add rule filter input tcp dport 22 ip saddr vmap @dict
add rule filter input tcp dport 22 drop

```

4.4 Come è stato usato

Si supponga di voler configurare un VPN client che gestisce una singola rete classe C: con il vecchio approccio di iptables sono necessarie esattamente 509 regole:

- 254 per trasformare gli indirizzi IP mappati negli indirizzi IP originali
- 254 regole per trasformare gli IP originali in quelli mappati
- 1 per gestire il NAT *al contrario*

nftables è stato adottato prima che si conducessero veri test sul campo in cui si potessero misurare le performance della soluzione basata su iptables, quindi non è stato possibile determinare quale fosse la scalabilità effettiva della vecchia proposta, certo è che con nftables *si riduce il numero di regole da 509 a 3*. Non solo, le nuove regole sono create utilizzando strutture dati performanti, e sono e rimarranno sempre 3, a prescindere che il client VPN mappi e rimappi una o n reti.

In particolare si è sfruttata la struttura dati *map* proprio come è stata descritta nella sezione precedente. Si definiscono due *named maps*, una per la gestione del PREROUTING chiamata *remapping*, ed una per il POSTROUTING chiamata *mapping*. La ragione per cui si sono scelte delle *named maps* è che consentono di essere modificate in seguito, per cui per qualsiasi eventualità un operatore può agire direttamente su esse lasciando intatte le regole. Di seguito un esempio, supponendo la seguente configurazione:

- OTN: 192.168.100.0/24
- MTN: 192.168.1.0/24
- subnet VPN: 10.7.0.0/24

Il file di script per nftables viene creato in maniera automatica usando la sintassi *strutturata*, di seguito se ne riporta, per brevità, solo un estratto.

```

#!/usr/sbin/nft -f
table ip ovpn_nat {

    map mapping {
        type ipv4_addr: ipv4_addr
        elements = {
            192.168.100.1: 192.168.1.1,

```

```
192.168.100.2: 192.168.1.2,
192.168.100.3: 192.168.1.3,
192.168.100.4: 192.168.1.4,
192.168.100.5: 192.168.1.5,
192.168.100.6: 192.168.1.6,
192.168.100.7: 192.168.1.7,
192.168.100.8: 192.168.1.8,
192.168.100.9: 192.168.1.9
...
192.168.100.254: 192.168.1.254
}
}

map remapping {
    type ipv4_addr: ipv4_addr
    elements = {
        192.168.1.1: 192.168.100.1,
        192.168.2.1: 192.168.100.2,
        192.168.1.3: 192.168.100.3,
        192.168.1.4: 192.168.100.4,
        192.168.1.5: 192.168.100.5,
        192.168.1.6: 192.168.100.6,
        192.168.1.8: 192.168.100.8,
        192.168.1.9: 192.168.100.9,
        ...
        192.168.1.254: 192.168.100.254
    }
}

chain prerouting {
    type nat hook prerouting priority 0; policy accept;
    ip saddr 10.7.0.0/24 dnat to ip addr map @remapping
}

chain postrouting {
    type nat hook postrouting priority 0; policy accept;
    ip saddr 10.7.0.0/24 ip daddr 192.168.100.0/24 masquerade
    ip daddr 10.7.0.0/24 snat to ip saddr map @mapping
}
}
```

Capitolo 5

Sicurezza della VPN

Questo capitolo è dedicato ad un'analisi della sicurezza della soluzione proposta. La prima sezione discute le proprietà di sicurezza di OpenVPN e delle configurazioni che sono state adottate per renderla sicura il più possibile. La sezione successiva descrive come si protegge la rete MoonCloud, visto che i VPN server sono dei nuovi punti di ingresso. L'ultima sezione descrive alcuni scenari di attacchi e come siano stati mitigati.

5.1 Sicurezza di OpenVPN

5.1.1 Protocollo

OpenVPN crea due canali di comunicazione tra client e server:

- `Control Channel` protetto con TLS ed usato per scambiarsi informazioni di servizio
- `Data Channel` utilizzato per l'effettivo scambio dei dati

Entrambi i due canali sono multiplexati su una singola connessione TCP o UDP. Poiché il protocollo TLS è stato progettato per funzionare su un livello di trasporto affidabile, questa affidabilità viene offerta da OpenVPN quando il protocollo di trasporto è UDP.

La sicurezza di OpenVPN può essere riassunto dalla seguente frase: "Use the IPsec ESP protocol for tunnel packet security, but then drop IKE in favor of SSL/TLS for session authentication"[18].

Di fatto, IPsec ESP qui corrisponde al `Data Channel`.

TLS utilizza uno scambio di chiavi Diffie-Hellman (è possibile anche uno scambio basato su RSA), che se usato propriamente garantisce la proprietà di *Perfect Forward Secrecy*, ciò significa che se anche la chiave privata contenuta nel certificato fosse compromessa ed un avversario avesse registrato tutto il traffico comunque non riuscirebbe a decifrarlo, poiché le chiavi utilizzate per Diffie-Hellman vengono generate *al volo* ad ogni connessione, e quindi anche se l'avversario potesse vedere le chiavi pubbliche Diffie-Hellman, comunque dovrebbe essere in grado di rompere tale algoritmo, il che non è assolutamente fattibile.

Le chiavi negoziate sono unidirezionali.

TLS offre diverse *cipher-suite*, in particolare quelle considerate migliori sono basate su uno scambio di chiavi Diffie-Hellman effimero su curva ellittica (ECDHE) ed un cifrario AEAD - *Authenticated Encryption with Associated Data*. Diffie-Hellman effimero garantisce la proprietà di *Perfect Forward Secrecy*.

Authenticated Encryption with Associated Data è una proprietà di sicurezza che garantisce confidenzialità, integrità ed autenticazione dei dati, oltre a autenticazione ed integrità di ulteriori dati *associati*, come ad esempio metadati relativi al protocollo che non devono essere anche essere segreti. Esistono algoritmi di cifratura che utilizzati nella maniera opportuna, tipicamente in combinazione con una funzione di MAC, garantiscono questa proprietà con un'unica chiave simmetrica (anziché con due chiavi, una per la cifratura ed una per il MAC).

Una volta completato il TLS handshake, i due partecipanti alla VPN generano del materiale pseudo casuale e lo trasmettono sul `Control Channel`: tale materiale è utilizzato per le chiavi nel `Data Channel`. Il `Data Channel`, proprio come TLS, garantisce *Authenticated Encryption*.

OpenVPN non ha pubblicato una specifica formale del proprio protocollo, tuttavia esistono in letteratura diverse analisi che hanno provato a ricostruire, con buon successo, il suo funzionamento mediante *protocol state fuzzing* (si veda ad esempio [6] e [14]). Il risultato è stato che non sono state trovate particolari vulnerabilità nel protocollo, sebbene altri test abbiano scovato vulnerabilità legate ad esempio ad una gestione scorretta della memoria (OpenVPN è scritto in C) [42].

5.1.2 Configurazioni

In questa sottosezione si affrontano tutte le scelte in merito a configurazioni specifiche di OpenVPN riguardanti la sicurezza.

Crittografia

OpenVPN consente di specificare quali algoritmi crittografici utilizzare in entrambi i canali. Fino a qualche versione fa, le ciphersuite del TLS vengono negoziate nel modo classico del TLS, mentre non era prevista alcuna modalità di negoziazione dei cifrari sul `Data Channel`, pertanto dovevano essere specificati nel file di configurazione. L'algoritmo di cifratura di default era Blowfish in modalità CBC combinato con HMAC-SHA1.

Nel 2016 due ricercatori francesi hanno pubblicato un attacco chiamato SWEET32 ([4]), il quale sostanzialmente sfrutta l'utilizzo di cifrari con una dimensione del blocco *piccola* (minore di 128 bit) in modalità CBC. Registrando una sufficiente quantità di traffico (circa 700 GB), un attaccante riesce con successo a decifrare il plaintext, supponendo che esso conosca ne conosca una buona parte. I ricercatori propongono l'esempio di una pagina servita su HTTPS che l'attaccante conosce, e di cui vuole scoprire il valore di un cookie. Questo attacco si applica a qualsiasi protocollo che utilizzi un cifrario con le caratteristiche sopra citate, e richiede molto traffico per poter aver successo, tuttavia nel caso di una VPN il fatto che vi sia molto traffico è la normalità.

Esempi di cifrari vulnerabili sono Blowfish, DES, 3DES: quindi OpenVPN è vulnerabile.

La prima contromisura che OpenVPN ha adottato è stata avvertire gli utenti mediante il file di log del fatto che si utilizzasse `Blowfish` e che esso è vulnerabile (naturalmente, solo nei casi in cui tale cifrario era effettivamente usato). Nelle ultime versioni è stata infine aggiunta la negoziazione dei cifrari, ed il cifrario di default non è più `Blowfish` ma `AES-GCM-256`, cioè AES in modalità GCM con chiavi a 256 bit. Poiché è un cifrario *AEAD*, garantisce autenticità ed integrità di per sé, per cui non occorre specificare anche un algoritmo MAC.

Protezione del Data Channel `AES-256-GCM` è il cifrario che si è scelto di utilizzare per la protezione del Data Channel. Si tratta di un algoritmo molto veloce, ed ovviamente molto sicuro. Sebbene sia il cifrario di default si è comunque scelto di specificare questo algoritmo in maniera esplicita. La direttiva è la seguente:

```
cipher AES-GCM-256
```

Configurazione di TLS Allo stesso modo, si è deciso di specificare in maniera esplicita quali siano le ciphersuite TLS, e si è stati molto stringenti. Anche in questo caso l'unica possibile è quella basata su `AES-256-GCM`, cioè:

`TLS-ECDHE-ECDSA-AES-GCM-256-SHA384`. Si può notare che si utilizza una ciphersuite *ECDHE – Elliptic Curve Diffie-Hellman Ephemeral*, e come tale si garantisce *Perfect Forward Secrecy*. Si utilizza `ECDSA` in quanto i certificati utilizzati hanno chiavi pubbliche per questo algoritmo. Per specificare questo si usa la direttiva:

```
tls-cipher TLS-ECHDE-AES-265-GCM-SHA384
```

Per forzare all'utilizzo dello scambio di chiavi Diffie-Hellman su curva ellittica, oltre a specificare le ciphersuite che lo utilizzano, occorre anche inserire il valore `"none"` alla direttiva `"dh"`:

```
dh none
```

La fase di handshake del TLS include anche la negoziazione della versione supportata da TLS, in modo che client e server utilizzino la versione più alta supportata da entrambi. In passato gli attaccanti riuscivano con successo a portare avanti il *Downgrade Attack* per il quale si riusciva a forzare un browser a negoziare una versione di TLS/SSL più bassa rispetto a quella effettivamente possibile. Per evitare alcun tipo di problema, si è scelto di specificare esplicitamente la versione nel seguente modo:

```
tls-version-min 1.2
```

Un'altra contromisura che viene consigliata per incrementare la sicurezza di OpenVPN è quella dello specificare il tipo di certificato che l'host si aspetta. E' infatti ragionevole presupporre che un server dovrebbe aspettarsi solo certificati demandati all'uso come client e viceversa. Nel file del server:

```
remote-cert-eku "TLS Web Client Authentication"
```

Mentre nel client:

```
remote-cert-eku "TLS Web Server Authentication"
```

Si utilizza infine, lato client, una direttiva che forza OpenVPN a verificare che il nome contenuto nel certificato del server sia corrispondente a quello specificato:

```
verify-x509-name <nome-certificato> name
```

Certificate Revocation List

Una *Certificate Revocation List* è una lista che contiene un elenco di certificati revocati (mediante i loro seriali), la data di revoca, ed eventualmente la ragione della loro revoca. Essa è emessa dalla CA che ha precedentemente emesso i certificati revocati, ed è firmata digitalmente dalla CA, in modo da attestarne l'autenticità e l'integrità.

OpenVPN supporta la verifica mediante CRL fatta lato server: quando un client si connette, OpenVPN legge tale CRL e, se il numero seriale del certificato del client è presente nella lista, la connessione con esso viene terminata. A differenza dei file di configurazione in `/etc/` che vengono letti solo all'avvio dal software, la CRL viene riletta ad ogni nuova connessione, pertanto è possibile aggiornarla senza preoccuparsi di dover riavviare il server.

La gestione della CRL (aggiornamento e trasferimento verso i server) viene effettuata dal microservizio MoonCloud_VPN, vi è una API REST dedicata alla revoca/cancellazione dei client.

La direttiva per utilizzare una CRL nel server è la seguente, assumendo che il file della CRL si trovi nella posizione indicata:

```
crl-verify /etc/openvpn/certs/crl.pem
```

5.1.3 Opzioni non ancora utilizzate

In questa sottosezione si mostrano alcune configurazioni che OpenVPN offre che non sono state utilizzate. Per ciascuna di esse vale la seguente considerazione: in futuro potranno essere adottate.

tls-crypt e tls-auth

Si tratta di ulteriori misure di sicurezza:

- **tls-crypt**: il Control Channel viene cifrato ulteriormente con una chiave precondivisa nota a tutti i partecipanti.
- **tls-auth**: il Control Channel viene protetto da un ulteriore layer di MAC usando una chiave statica che deve essere nota a tutti i partecipanti a priori.

Per entrambe, la cifratura/MAC viene applicata dal *primo* pacchetto scambiato, compresi quindi quelli appartenenti al TLS handshake. Lo scopo principale è quello di mitigare attacchi DoS: se il server riceve un pacchetto con HMAC non

valido, o che non riesce a decifrare, immediatamente dropa la connessione, anziché iniziare il TLS handshake (che eventualmente fallirebbe nel caso l'attaccante non avesse nessun certificato valido). Se questa chiave precondivisa fosse compromessa rimarrebbero comunque i certificati come forma effettiva di protezione, infatti i certificati sono e rimangono l'effettiva forma di autenticazione.

Si è scelto di non adottare questa soluzione per ora a causa della necessità di dover gestire in modo sicuro la chiave precondivisa: essa deve essere nota a tutti i partecipanti alla VPN. Nel caso in cui essa fosse compromessa occorrerebbe cambiare *tutte* le chiavi, poiché sebbene rimanga la protezione dei certificati, una chiave compromessa non garantirebbe nessun livello di protezione, per cui bisognerebbe generarne una nuova e redistribuirla. In futuro si parla di usare chiavi diversi per ogni coppia client-server, rimuovendo quindi la necessità di sostituire *tutte* le chiavi in caso di compromissione. Non si esclude che a quel punto tale soluzione verrà adottata.

A puro scopo di documentazione, il comando per generare una chiave valida per `tls-auth` o `tls-crypt` e scriverla in un file chiamato `tls_crypt.key` è il seguente:

```
openvpn --genkey --secret tls_crypt.key
```

Il contenuto di tale file è simile al seguente:

```
#
# 2048 bit OpenVPN static key
#
-----BEGIN OpenVPN Static key V1-----
54d84d5baa8534de608864311958bc82
26d630157c0f7c03306d83f52eda7b6e
bd5b95cfb9f107e1e968fb14d72ba515
81f9fdb74473eea7e68682483c026170
532994275e0c81a07f23231aeefa816a
837dbd8ccba4fbbac1fd281dc986e403
cb6486b57066b96790bae3b1d102757d
3c09b96c0f21f8e5d5836301b41aab11
d55c4167110952971fd698fc89c03c5f
897c487adb18149d892668c0c54f1fe2
6a65c112acbbd4f00977993d073e34ae
140bc7159da6a9a7c5075b6baf6dcf26
545cfe36478ed731cb53e5a3a36bdc0
3f92ecec02d8060ff3afb3b58c560ae5
48f0a13a443cebe31431f8234586c0f9
20c5f523330dc5b0ff5e4c9478bd2357
-----END OpenVPN Static key V1-----
```

tls-verify

`tls-verify` è un hook che scatta quando un client ha appena concluso il TLS handshake ed ha passato tutte le verifiche, tranne, eventualmente, quella della

CRL. Il processo lanciato con questo hook ha accesso ad un certo numero di variabili d'ambiente (minori rispetto a `client-connect` perché non è stato ancora completamente accettato).

Si può usare questo hook per una sorta di *abilitazione esplicita* dei client: ad esempio si può verificare che il seriale del certificato sia in una lista di seriali ammessi (anziché semplicemente accettare il client perché ha un certificato valido). A puro titolo esemplificativo, si presente uno script in Python che verifica che il seriale, passato come variabile d'ambiente, sia in una lista di seriali noti, in caso positivo ritorna 0, sennò -1.

```
#!/usr/bin/env python3

import os

# lista dei seriali ammessi
clients = ['3', '4']

returned_value = -1

# accesso alla variabile d'ambiente
serial = os.getenv('tls_serial_0', None)

# se la variabile d'ambiente non è definita ritorna 0,
# perché vi sono casi 'leciti' in cui
# tale variabile non sia settata, cioè quando si stanno
# verificano tutti i certificati superiori nella
# gerarchia a quello del client in questione.
if serial is None or (serial is not None and serial in clients):
    returned_value = 0

exit(returned_value)
```

Per abilitare l'uso dello script:

```
tls-verify /etc/openvpn/server/cs/tls_verify.py
```

In un uso reale la lista dei seriali potrebbe essere recuperata da un file di testo o da un database SQLite¹.

5.2 Protezione di MoonCloud

L'utilizzo di OpenVPN per collegare la rete MoonCloud alle reti target presenta un semplice problema di sicurezza: la VPN *apre* un nuovo punto di ingresso in MoonCloud, e come tale deve essere protetto il più possibile.

A tale scopo sono state predisposte delle regole iptables da applicare ai server OpenVPN, essendo essi i *punti di esposizione*.

¹<https://www.sqlite.org/index.html>

Sebbene il *NAT lato server* di fatto agisca come una sorta di firewall consentendo solo al traffico proveniente dalla rete di MoonCloud ed alle sue risposte di arrivare ed essere accettato dal server, esso non è sufficiente. Lo scenario dettagliato di seguito ne è infatti la prova.

Se qualcuno, ad esempio un attaccante, effettuasse delle connessioni da un VPN client legittimo senza utilizzare il mappaggio degli indirizzi IP (passando per la VPN) esse arriverebbero senza problemi al VPN server ed anche oltre. Questo perché OpenVPN server si limita a decifrare i pacchetti provenienti dal client ed a scriverli sulla scheda di rete virtuale. Allo stesso modo iptables applica il NAT in uscita verso la VPN solo per i pacchetti destinati ad una rete mappata, e relativa traduzione inversa. Per pacchetti che non provengono da una rete mappata iptables non effettua la traduzione inversa (perché tali pacchetti non matchano le regole), per cui semplicemente i pacchetti passano. Un attaccante riesce quindi con successo (è stato testato) ad inviare pacchetti al server in questo modo. Gli si presentano però alcuni problemi:

- se volesse inviare pacchetti ad una qualsiasi *Docker machine* passando per il VPN server, dovrebbe conoscerne l'indirizzo IP
- non avrebbe modo di vedere le risposte alle proprie richieste, poiché esse sono fatte con l'IP sorgente reale e non mappato, e le *Docker machine* non hanno nessuna rotta configurata che dica che le risposte verso tali indirizzi IP *reali* debbano passare per il VPN server. Alla peggio, l'indirizzo IP sorgente originale della rete target usato dall'attaccante corrisponde ad un'altra rete rimappata, a cui eventualmente tornerebbero risposte.

Sebbene esistano questi due ostacoli, rimangono comunque due possibilità che l'attaccante può sfruttare:

- mandare pacchetti al server
- mandare pacchetti alle *Docker machine*, assumendo di conoscerne l'indirizzo IP, senza curarsi delle risposte.

Per contrastare questa possibile minaccia, come anticipato, si è utilizzato iptables. L'idea delle regole applicate si può riassumere così:

- usare una politica `DEFAULT DENY` sul VPN server per cui *solo il traffico da MoonCloud verso la rete target e le risposte ad esso* possono passare sul server
- ogni volta che un nuovo client si connette, si *concede alle reti mappate di tale client* l'accesso.

Naturalmente, queste regole devono riguardare solo il traffico proveniente/destinato alla VPN, pertanto un ulteriore matching applicato alle regole riguarda la scheda di rete virtuale destinazione/sorgente dei pacchetti, che appunto deve essere quella di OpenVPN. Poiché tali schede seguono tutte la stessa nomenclatura, ovvero iniziano con `"ovpn"`, è stato facile applicare le restrizioni in questione².

La protezione è stata affidata ad iptables inizialmente ed a nftables poi. Concettualmente, le regole applicate sono le stesse. Si mostrano prima le regole iptables.

²Si ricorda che è possibile specificare nel file di configurazione di OpenVPN quale nome dare alle schede di rete virtuali.

5.2.1 Politica di default

```
iptables -t filter -I INPUT -i ovpn+ -j DROP
iptables -t filter -I FORWARD -i ovpn+ -j DROP
```

Le due regole che si vedono applicano la politica di `DEFAULT DENY`:

- `iptables -t filter -I INPUT -i ovpn+ -j DROP` dice di dropare il traffico ricevuto (`INPUT`) da tutte le schede di rete che iniziano con “ovpn” (il carattere “+” fa da *jolly*) e destinato al server locale
- `iptables -t filter -I FORWARD -i ovpn+ -j DROP` invece dice di dropare il traffico in transito sul server locale (`FORWARD`) (quindi destinato a MoonCloud) che è stato ricevuto dalla schede di rete OpenVPN

Si tratta di una politica di `DEFAULT` poiché si usa il flag “-I” che indica di aggiungere la regola in questione all’inizio della chain, e per tale ragione sarà la prima valutata da iptables. Il flag “-i <NIC-name>” è un match per pacchetti che sono stati ricevuti da una scheda di rete con nome “<NIC-name>”.

Queste regole vengono inserite sui server OpenVPN appena vengono creati, e devono essere sempre reinserite ad ogni riavvio, poiché sono la *base* di tutto il meccanismo di protezione di MoonCloud. E’ fuori da questa sede la discussione di come garantire la persistenza delle regole iptables tra un riavvio e l’altro.

5.2.2 Traffico consentito

Lo step successivo la definizione delle politiche di default è definire le regole che consentano al traffico legittimo di passare.

Queste regole si attivano ogni volta che un client si connette al server, e per questo motivo si sfrutta ancora una volta l’hook `client-connect` di OpenVPN. Nello script che viene eseguito dal server quando un client si è connesso vi sono anche delle regole iptables per consentire alle *sole richieste dalle Docker machine alle reti mappate di tale client ed alle sue risposte* di transitare. Supponendo che la rete rimappata di un client dal `CommonName = client100` sia `192.168.100.0/24`, le regole per farlo sono:

```
iptables -t filter -I OUTPUT -d 192.168.100.0/24 -o ovpn+
↪ -m state --state NEW,RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
iptables -t filter -I INPUT -s 192.168.100.0/24 -i ovpn+ -m
↪ state --state RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
iptables -t filter -I FORWARD -s 192.168.100.0/24 -i ovpn+
↪ -m state --state RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
```

Innanzitutto, si utilizzano regole *stateful*, per cui iptables mantiene una tabella di stato: per ogni nuova connessione, se consentita, si inserisce una nuova entry in tale tabella. Tutti i successivi pacchetti in arrivo sono consentiti senza ulteriori verifiche se appartengono ad una connessione già iniziata. Ciò rende più difficile attacchi di *TCP Session Hijacking*, dove un attaccante tenta di inserirsi in una connessione TCP.

- `iptables -t filter -I OUTPUT -d 192.168.100.0/24 -o ovpn+ ...-j ACCEPT` è la regola che consente al traffico generato localmente e destinato ad OpenVPN di passare. Non c'è un corrispettivo nelle regole di default poiché si tratta di *traffico generato dal server*, non da qualcuno di esterno, pertanto non vi è motivo di negare di default questo tipo di traffico. L'unico traffico consentito rimane comunque quello verso la rete mappata 192.168.100.0/24.
- `iptables -t filter -I INPUT -s 192.168.100.0/24 -i ovpn+ ...-j ACCEPT` invece è la regola inserita ("`-I`") in una posizione più specifica rispetto alla regola di default che nega il traffico ricevuto da OpenVPN e destinato localmente, di passare. Con questa regola si consente solo al traffico proveniente da 192.168.100.0/24 destinato al server di transitare. In particolare, si consente *alle sole risposte* (`-m state --state RELATED, ESTABLISHED`) provenienti da 192.168.100.0/24 di passare. E' molto importante la mancanza di "`-state NEW`", poiché è ciò che abilita, appunto, le sole risposte.
- `iptables -t filter -I FORWARD -s 192.168.100.0/24 -i ovpn+ ...-j ACCEPT` al pari della precedente, è più specifica rispetto alla regola che di default vieta il traffico dal server OpenVPN verso MoonCloud. Eseguiendola, si consente *alle sole risposte* provenienti da 192.168.100.0/24 di raggiungere le *Docker machine*. Come nella precedente, si noti che manca "`-state NEW`".

Rimozione delle regole Poiché le regole appena elencate devono essere aggiunte al server OpenVPN solo quando un client si connette, è chiaro che devono essere altresì rimosse quando esso si disconnette. Per farlo ci si affida all'`hook client-disconnect`, riscrivendo le stesse regole ma con l'opzione "`-D`", che indica di rimuovere la regola così composta.

Supponendo sempre di aver a che fare con `client100`, per rimuovere le precedenti regole:

```
iptables -t filter -D OUTPUT -d 192.168.100.0/24 -o ovpn+
↪ -m state --state NEW,RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
iptables -t filter -D INPUT -s 192.168.100.0/24 -i ovpn+ -m
↪ state --state RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
iptables -t filter -D FORWARD -s 192.168.100.0/24 -i ovpn+
↪ -m state --state RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
```

Le regole combaciano alla perfezione con quelle usate in `client-connect`, in questo modo `iptables` può rimuoverle con successo.

5.2.3 Configurazione applicata

Sebbene sia già stato mostrato nel capitolo precedente (a partire da pagina 72), di seguito si riporta come si presentano i file `client-up.sh` e `client-down.sh`, assumendo, come in precedenza, che la rete mappata di `client100` sia 192.168.100.0/24.

```

# /etc/openvpn/ovpn1/cs/client-up.sh

#!/bin/bash

if [ "$common_name" == "client100" ]; then
    # aggiunta rotta
    ip route add 192.168.100.0/24 via 10.7.0.1

    # aggiunta nat lato server
    iptables -t nat -A POSTROUTING -d 192.168.100.0/24 -j
    ↪ MASQUERADE

    # aggiunta traffico consentito
    iptables -t filter -I OUTPUT -d 192.168.100.0/24 -o ovpn+
    ↪ -m state --state NEW,RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
    iptables -t filter -I INPUT -s 192.168.100.0/24 -i ovpn+
    ↪ -m state --state RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
    iptables -t filter -I FORWARD -s 192.168.100.0/24 -i
    ↪ ovpn+ -m state --state RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
fi

# /etc/openvpn/ovpn1/cs/client-down.sh

#!/bin/bash

if [ "$common_name" == "client100" ]; then
    # rimozione rotta
    ip route del 192.168.100.0/24 via 10.7.0.1

    # rimozione nat lato server
    iptables -t nat -D POSTROUTING -d 192.168.100.0/24 -j
    ↪ MASQUERADE

    # rimozione regole di filtraggio
    iptables -t filter -D OUTPUT -d 192.168.100.0/24 -o ovpn+
    ↪ -m state --state NEW,RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
    iptables -t filter -D INPUT -s 192.168.100.0/24 -i ovpn+
    ↪ -m state --state RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
    iptables -t filter -D FORWARD -s 192.168.100.0/24 -i
    ↪ ovpn+ -m state --state RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT
fi

```

5.2.4 Protezione con nftables

Si sfrutta appieno la struttura dati *Set*: l'idea è che si abbiano delle regole di default analoghe alle precedenti, e che si usi un insieme in cui si inseriscano le reti mappate. In questo modo, quando un client si connette si devono solo aggiungere elementi a tale insieme; viceversa quando si disconnette ("client-disconnect")

è sufficiente rimuovere elementi da esso. In questo modo, si mantengono un certo numero di regole fisse (poche), aumentando le prestazioni del firewall.

Le regole sono raccolte in un file `init.nft` che deve essere eseguito sui VPN server al loro avvio:

```
#!/usr/sbin/nft -f

table ip ovpn_management {

    # 'interval' perché si inseriranno
    # dei NET ID
    set allowed_clients {
        type ipv4_addr;
        flags interval;
    }

    # traffico generato dal server verso i client
    chain output {
        type filter hook output priority 0; policy accept;
        ip daddr @allowed_clients meta oifname "ovpn*"
        ct state new,related,established accept
    }

    # traffico dai client destinato al server
    chain input {
        type filter hook input priority 0; policy accept;
        # consentire traffico dai client registrati
        ip saddr @allowed_clients meta iifname "ovpn*"
        ct state related,established accept
        # tutto il resto del traffico che viene dalla VPN
        # viene droppato
        meta iifname "ovpn*" drop
    }

    # traffico dai client alle Docker machines
    chain forward {
        type filter hook forward priority 0; policy accept;
        # consentire traffico dai client registrati
        ip saddr @allowed_clients meta iifname "ovpn*"
        ct state related,established accept
        # il resto del traffico che viene dalla VPN viene
        # droppato
        meta iifname "ovpn*" drop
    }

    # masquerading verso la VPN
    chain masquerading {
        type nat hook postrouting priority 0; policy accept;
```

```

        ip daddr @allowed_clients meta oifname "ovpn*" masquerade
    }
}

```

Infine, ecco come si presentano i nuovi file per gli hook `client-connect` e `client-disconnect`.

```

# /etc/openvpn/ovpn1/cs/client-up.sh

#!/bin/bash

if [ "$common_name" == "client100" ]; then
    ip route add 192.168.100.0/24 via 10.7.0.1
    nft add element ovpn_management allowed_clients {
        ↪ 192.168.100.0/24 }
fi

# /etc/openvpn/ovpn1/cs/client-down.sh

#!/bin/bash

if [ "$common_name" == "client100" ]; then
    ip route del 192.168.10.0/24 via 10.7.0.1
    nft delete element ovpn_management allowed_clients {
        ↪ 192.168.100.0/24 }
fi

```

5.3 Scenari di attacco

In questa sezione si discutono alcuni scenari di attacco che sfruttano il collegamento VPN. Per ciascuno di essi, si utilizza la seguente struttura:

Scenario Una breve descrizione dello scenario.

Livello di difficoltà Lo sforzo richiesto all'attaccante per portare a termine l'attacco, di cosa deve disporre per avere successo.

In caso di successo Che cosa otterrebbe l'attaccante in caso di successo.

Criticità Quanto è grave l'attacco.

Prevenzione Le principali misure per mitigare la possibilità che l'attacco si verifichi.

Ulteriori misure preventive Ulteriori misure di prevenzione secondaria attuate e attuabili.

Cosa fare in caso di attacco Nel caso in cui l'attacco si verifichi, quali contromisure occorre adottare. Oltre a quelle indicate, è sempre necessario verificare *come mai* l'attacco si sia verificato (ovvero: *come ha fatto l'attaccante a riuscirci?*).

Poiché allo stato delle cose non è ancora stato approntato come sarà effettivamente realizzato il VPN client (es: quale versione di Linux? Quali utenti? Quali interfacce? Ecc...), è prematuro analizzare le contromisure da attuare sui client. Inoltre, è comunque possibile che l'attaccante usi un proprio dispositivo client, su cui ovviamente MoonCloud non ha controllo.

E' molto importante notare che la protezione data dalle regole di firewalling è molto efficace, anche nei casi di attacchi con livello di criticità alto.

5.3.1 Scenario 1

Scenario Attacco (D)DoS verso i VPN server.

Livello di difficoltà Basso, è sufficiente disporre di sufficiente potenza di calcolo.

In caso di successo L'operatività di MoonCloud sarebbe compromessa per tutta la durata dell'attacco.

Criticità Alta, anche grazie alla relativa facilità dell'attacco.

Prevenzione Sebbene si assume che l'attaccante non disponga di certificati validi, e che quindi la connessione VPN non andrebbe a buon fine, se l'attaccante riuscisse a creare un'adeguata mole di traffico, allora riuscirà a sovraccaricare il server quanto basta per causare un'interruzione di servizio. L'opzione `tls-crypt` potrebbe mitigare gli effetti dell'attacco, oppure richiedere maggiore sforzo all'attaccante. Non sarebbe comunque una soluzione definitiva.

Ulteriori misure preventive Non vi sono altre misure di prevenzione.

Cosa fare in caso di attacco E' tristemente noto come sia difficile proteggersi da attacchi DoS. Si potrebbero spegnere i server coinvolti nell'attacco (e magari anche quelli non coinvolti per precauzione) fino a che l'ISP non riesce a bloccare il traffico malevolo in anticipo.

5.3.2 Scenario 2

Scenario Inviare pacchetti malevoli alla rete MoonCloud da un host della rete target.

Livello di difficoltà Alto. In questo caso si ipotizza che vi sia un host compromesso in una rete target connessa a MoonCloud mediante un VPN client legittimo. La compromissione dell'host è avvenuta *a prescindere* da MoonCloud. La difficoltà sta nel passare tutte le misure di protezione poste in essere.

In caso di successo L'attaccante riuscirebbe ad inviare dei pacchetti malevoli verso i *Docker host* ed il VPN server.

Criticità Bassa, l'attacco non dipende da vulnerabilità nell'infrastruttura MoonCloud.

Prevenzione Vi sono due misure principali che ostacolano grandemente la possibilità di successo per l'attaccante:

- le regole nftables lato server che consentono solo alle richieste provenienti da MoonCloud ed alle risposte di transitare
- il *NAT al contrario*, per definizione stessa di NAT, consente in entrata (dalla rete target verso il VPN client) solo il traffico in risposta.

Per queste due ragioni i pacchetti generati specificamente dall'host compromesso e diretti a MoonCloud non passerebbero.

Ulteriori misure preventive Nessuna.

Cosa fare in caso di attacco Scollegare il client VPN dalla rete compromessa o dal VPN server metterebbe completamente al riparo.

5.3.3 Scenario 3

Scenario Inviare pacchetti malevoli alla rete MoonCloud mediante un VPN client non legittimo.

Livello di difficoltà Basso. Si suppone che l'attaccante abbia a disposizione un qualsiasi dispositivo con OpenVPN installato, e che voglia connettersi ad un VPN server e sfruttarlo per inviare pacchetti malevoli alla rete MoonCloud.

In caso di successo Non vi sono possibilità di successo, perché non disponendo di un VPN client valido, non riuscirebbe a connettersi.

Criticità Bassa a causa dell'impossibilità di successo.

Prevenzione OpenVPN rifiuta connessioni da client che non riesce a verificare.

Ulteriori misure preventive Nessuna.

Cosa fare in caso di attacco Se non si tratta di un attacco DoS, non c'è molto da fare, se non ovviamente identificare la fonte, eventualmente spegnere i VPN server sotto attacco.

5.3.4 Scenario 4

Scenario Inviare pacchetti malevoli alla rete MoonCloud mediante un VPN client legittimo (in tutto o in parte).

Livello di difficoltà Medio. Si suppone che l'attaccante abbia a disposizione un VPN client legittimo, ovvero con un certificato valido. E' possibile che l'attaccante sia riuscito ad ottenere un VPN client *ufficiale*, o che sia riuscito ad ottenere da esso un certificato valido.

In caso di successo L'attaccante riuscirebbe a connettersi ai server VPN, ma le sue possibilità si fermerebbero lì grazie alle regole di firewalling.

Criticità Media, la rete MoonCloud è intatta e la vulnerabilità è eventualmente sul client VPN.

Prevenzione Grazie alle regole di firewalling sui server, se anche l'attaccante ottenesse dei certificati validi, non potrebbe *in ogni caso* inviare pacchetti a MoonCloud, poiché sono consentite solo risposte a richieste dalle *Docker machine*.

Ulteriori misure preventive E' possibile revocare il certificato usato dall'attaccante, limitando del tutto la sua possibilità di azione.

Cosa fare in caso di attacco Il servizio MoonCloud_VPN offre una API dedicata alla revoca dei certificati, questo è il primo passo da seguire.

5.3.5 Scenario 5

Scenario Compromissione della chiave private della CA

Livello di difficoltà Alto: la chiave privata della CA non è mai distribuita al di fuori della rete MoonCloud, tantomeno viene distribuita ai VPN server.

In caso di successo Un attaccante potrebbe generare dei nuovi certificati validi per client VPN. Egli potrebbe quindi connettersi senza alcuna difficoltà ai VPN server.

Criticità Molto alta, l'attaccante è per forza di cose riuscito ad introdursi nella rete MoonCloud ed aver ottenuto la chiave privata.

Prevenzione La chiave privata è utilizzata *esclusivamente* dal microservizio MoonCloud_VPN, e sono in approntamento misure di protezione basate su firewall per far sì che solo richieste legittime arrivino al servizio.

Ulteriori misure preventive Anche se l'avversario riuscisse a connettersi, non potrebbe comunque modificare le regole di firewalling che consentono alle sole risposte di transitare dai VPN server verso la rete MoonCloud. Per limitare ulteriormente lo spazio di manovra dell'attaccante si può usare l'opzione `tls-verify` per una sorta di *abilitazione esplicita*.

Cosa fare in caso di attacco E' chiaro che la compromissione della chiave privata sia uno scenario estremamente grave, pertanto vi sono numerose contromisure attuabili per limitare i danni. Tuttavia, in caso in cui questo si verifichi, occorre spegnare i server VPN, e chiaramente generare delle nuove chiavi.

Capitolo 6

MoonCloud_VPN

MoonCloud_VPN è il nome del microservizio che è stato scritto per l'automazione della gestione di tutti gli aspetti legati alla soluzione VPN proposta; questo capitolo è dedicato alla sua descrizione, si mostreranno anche degli esempi di codice. Un elenco delle principali caratteristiche:

- scritto in Python usando il framework Django ¹
- in produzione viene deployato in un container Docker
- si sfrutta il DBMS PostgreSQL ed il Key-Value store Redis ^{2 3}

6.1 Requisiti

Il microservizio implementa delle API REST per le seguenti funzionalità:

Configurazione VPN server Creazione di tutti i file di configurazione necessari ad OpenVPN server per funzionare.

Configurazione device client Creazione di tutti i file richiesti al device VPN client, compresi quelli necessari ad OpenVPN ed il file per nftables.

Gestione dei certificati Client e server hanno bisogno di certificati X509 per poter stabilire un collegamento VPN. E' richiesto di creare tali certificati, sia per client sia per server, e di gestirne il loro ciclo di vita, compreso di rinnovo.

Trasferimento file Una volta che file di configurazione e certificati sono stati creati, devono essere trasferiti sui VPN server in maniera *sicura*. Allo stesso modo, ogni volta che si crea un nuovo client, occorre aggiornare la configurazione del server a cui si conatterà (si pensi ai file `client-up.sh` e `client-down.sh`). Questo trasferimento deve preservare l'integrità della configurazione dei server.

¹<https://www.djangoproject.com/>

²<https://www.postgresql.org/>

³<https://redis.io/>



Figura 6.1: Il deployment di MoonCloud_VPN. I rettangoli con linee in grassetto rappresentano le VM su cui vi sono i VPN server, mentre quelli con contorno normale rappresentano i tre container di cui il deployment si compone.

Visualizzare informazioni Devono essere disponibili delle API che ritornino informazioni su specifici client e server, incluse anche informazioni sui certificati.

Gestione dell'IP mapping Questa attività si scompone in:

- ogni volta che si crea un nuovo client VPN, allocare ad esso n reti mappate univoche per il server al quale esso si collegherà
- dato un indirizzo IP originale di un certo client, ritornare l'IP mappato
- *Blacklisting*: deve essere possibile specificare che alcuni indirizzi IP (indirizzi di host o indirizzi di rete) o nomi di dominio⁴ non devono essere mai assegnati a reti mappate.

Revocare client Per varie ragioni deve essere necessario poter revocare un client. Questa attività si traduce nell'invalidare il certificato ad esso relativo e nella cancellazione del mappaggio dal database. La revoca deve essere propagata ad ogni server in modo che esso non riesca per nessun motivo a connettersi nuovamente alla VPN di MoonCloud.

6.2 Architettura

Il deployment del microservizio si compone di un container su cui è in esecuzione Django, cioè il web framework che espone le API REST, di un secondo container su cui è in esecuzione PostgreSQL, di un terzo dedicato a Redis. La figura 6.1 mostra quanto descritto. Non è escluso che in futuro questo servizio venga separato in microservizi ancora più piccoli, ad esempio si sta studiando la separazione della parte di trasferimento file. Realizzarlo non sarebbe difficile poiché le singole componenti sono il più possibile separate ed indipendenti.

Il microservizio è composto da diversi moduli, ciascuno dei quali ben specializzato per una certa funzionalità, ad esempio: creazione file di configurazione server, creazione file per nftables, trasferimento file, ecc... Il modulo `controllers.py` definisce una serie di funzioni che, tramite `views.py` risponde direttamente alle

⁴Si intende l'indirizzo IP corrispondente a tale nome di dominio.

chiamate alle API del servizio. Si cura di chiamare i metodi delle classi di tutti gli altri moduli.

client Questo modulo si occupa delle configurazioni relative ai client VPN. In particolare, contiene classi responsabili di creare il file di configurazione principale per un VPN client, creare i file client-specific da trasferire sul server, creare il file di script per nftables dato il mapping da usare per quel client.

dnmcp Si occupa in maniera specifica di creare il mapping date le reti originali. Una volta che è stato definito, è responsabile di salvarlo nel database.

dns Un modulo specifico dedicato alla risoluzione dei nomi DNS relative al blacklisting. Oltre a risolvere nuovi nomi ricevuti in input, è anche responsabile di aggiornare tutti quelli presenti nel database. La risoluzione viene fatta in maniera asincrona, ovvero si fanno tutte le query necessarie, una dopo l'altra senza aspettare risposta, e solo quando l'ultima è stata completata si aspettano i risultati complessivi. Questo consente di aumentare le performance mediante I/O non bloccante.

openssl Una classe preposta alla creazione, revoca ed aggiornamento dei certificati di client e server, e gestione della CRL. Utilizza una libreria Python che a sua volta utilizza OpenSSL come backend.

server Il compito dell'unica classe di questo modulo è quello di creare il file di configurazione principale per un VPN server, dati una serie di parametri in input.

trans Il nome del modulo è l'abbreviazione di "transfer". Si compone di una serie di classi responsabili di trasferire file sui server mediante `sftp` (trasferimento file su un canale sicuro SSH) e di creare la struttura di directory così come assunta nel file di configurazione di OpenVPN (esempio: creare le cartelle `/etc/openvpn/.../ccd/` e `/etc/openvpn/.../certs`).

workers Contiene la classe `SSHBackgroundWorker` la quale, mediante due thread separati, si occupa del trasferimento mediante il modulo `trans`. Maggiori dettagli su questa funzionalità verranno fornite in seguito durante il capitolo.

Infine si descrivono i seguenti moduli:

controllers Organizzato in diversi file, questo modulo si occupa di *unire* le funzionalità messe a disposizione da tutti gli altri moduli, oltre a creare le istanze dei dati da memorizzare nel database.

models Contiene la definizione delle tabelle memorizzate nel DBMS, secondo i cosiddetti "Model" nella terminologia Django⁵.

views Definisce le API a cui il microservizio risponde, deserializza e serializza gli input e gli output, fa le chiamate a `controllers`, ne intercetta eventuali errori.

⁵<https://docs.djangoproject.com/en/2.1/topics/db/models/>

6.3 Dettagli

In questa sezione si affrontano in maniera più dettagliata le principali funzionalità offerte dal microservizio. In letteratura (es: [39], [29]) vi è un ampio dibattito su quale sia l'effettiva dimensione di un microservizio, e di fatto si dice che esso dovrebbe fare una cosa ed una soltanto. Si potrebbe quindi dire che questo principio non è completamente rispettato in MoonCloud_VPN. A tale proposito, vanno fatte le seguenti osservazioni:

- il microservizio nella sua interezza non è particolarmente complesso, anche dal punto di vista algoritmico, a parte il trasferimento file ed il mappaggio delle reti il codice è abbastanza semplice. Si tratta di circa 4000 righe di codice Python, escludendo i test ed ulteriori script, che è una dimensione ragionevole.
- Il microservizio svolge una precisa funzionalità, ovvero gestire tutto ciò che riguarda la configurazione di OpenVPN per MoonCloud.

Queste considerazioni hanno portato a lasciare questo microservizio come un *unico* microservizio.

6.3.1 Certificate Management

Requisito fondamentale per il funzionamento di OpenVPN è che client e server dispongano di certificati X509 firmati da una stessa CA. A tale scopo, si dispone di una CA interna, la cui chiave pubblica e privata è deployata assieme a questo servizio⁶. Attualmente il certificato è self-signed, in futuro potrebbe non essere così.

OpenVPN richiede, sia per client sia per server, che siano settati alcuni attributi specifici nei certificati, da cui poi derivano le direttive `"remote-cert-eku "TLS Web Server/Client Authentication"`. Ogni certificato ha un seriale univoco, il quale viene generato in maniera pseudocasuale usando una funzione preposta dalla libreria che viene utilizzata.

Il microservizio mantiene anche una CRL – *Certificate Revocation List*, la quale contiene l'elenco dei seriali dei certificati revocati, la ragione (nel cui caso è `"unspecified"`), ed è firmata digitalmente dalla chiave privata della CA.

Ogni volta che si revoca un nuovo client, occorre creare una nuova CRL inserendo tutti i precedenti certificati revocati ed aggiungendo quello del client in questione. La CRL deve poi essere distribuita a tutti i server, ma questo è compito di un altro modulo.

I certificati sono generati utilizzando l'algoritmo ECDSA, con livello di sicurezza 128 bit per client e server. Secondo le raccomandazioni del NIST, un livello di sicurezza di 128 bit è sicuro fino al 2030 [3]. Si può passare senza problemi ad un livello di sicurezza maggiore (192 o 256), semplicemente modificando i settaggi del microservizio.

⁶In futuro si adotteranno misure di protezione per la chiave privata, oltre alla protezione *fisica* (es: regole di firewall) dell'accesso al servizio.

Per il certificato della CA, si utilizza invece una curva ellittica con livello di sicurezza di 256 bit.

Tutto il codice per la gestione di queste funzionalità è implementato nel modulo `openssl` mediante il file `openssl.py`, di cui di seguito si mostra un estratto leggermente modificato. Si può vedere come si crea un certificato ed una CRL vuota (metodo “`create_empty_crl`”, per la quale vi si aggiunge un certificato *fake* il cui numero seriale vale 1 (questo per avere una CRL che contenga almeno un certificato, ed evitare problemi con CRL vuote). Il tipo di certificato (client o server), dipende dai parametri con cui si chiama il metodo “`create_keys_and_cert`”. Alcuni metodi sono omessi per brevità, tra essi il costruttore.

```
import cryptography.hazmat.backends as backends
import cryptography.hazmat.primitives.asymmetric.ec as ec
import cryptography.hazmat.primitives.hashes as hashes
import cryptography.hazmat.primitives.serialization as serialization
import cryptography.x509 as x509

class OpenSSL(object):

    def __get_ca_private_key(self):
        if self.__root_ca_key_path is None:
            raise Exception('You should have provided the ca\'s key')

        ca_priv_key_file = open(self.__root_ca_key_path, 'rb')

        ca_private_key = serialization.load_pem_private_key(
            data=ca_priv_key_file.read(),
            backend=backends.default_backend(),
            password=None,
        )

        ca_priv_key_file.close()
        return ca_private_key

    def __get_revoked(self, serial):
        return x509.RevokedCertificateBuilder(
        ).serial_number(
            int(serial)
        ).revocation_date(
            datetime.datetime.today()
        ).add_extension(
            x509.CRLReason(x509.ReasonFlags.unspecified),
            critical=False
        ).build(backend=backends.default_backend())

    def __get_crl_builder(self, issuer_name, crl_number, last_update):
        return x509.CertificateRevocationListBuilder(
        ).issuer_name(
            issuer_name
        ).last_update(
            last_update
        ).next_update(
            last_update + self.NEXT_UPDATE
        ).add_extension(
            x509.CRLNumber(crl_number),
```

```

        critical=False
    )

def create_empty_crl(self):
    """
    Generates a certification revocation list (CRL) with
    a single revoked cert with serial = 1.

    :rtype str the path to the CRL.
    """

    cert = self.__get_ca_cert()
    if self.__crl_path is None or self.__crl_path == '':
        self.__crl_path = os.path.abspath(os.path.join(
            self.__directory, 'crl.pem'))

    crl_builder = self._get_crl_builder(
        issuer_name=cert.issuer,
        crl_number=1,
        last_update=datetime.datetime.today()
    )

    revoked = self._get_revoked(1)
    crl_builder = crl_builder.add_revoked_certificate(revoked)

    crl = crl_builder.sign(
        private_key=self.__get_ca_private_key(),
        algorithm=hashes.SHA512(),
        backend=backends.default_backend()
    )

    self.__write_public_bytes(self.__crl_path, crl)
    return self.__crl_path

def _basic_cert_setup(self, data, cert_type, serial=None):
    """
    Does a basic setup for the certificate.

    - deciding which curve to use
    - setting all of the attributes of the cert
    - generating a serial if not given

    :rtype tuple:
    - tuple[0] private_key
    - tuple[1] public_key
    - tuple[2] str serial
    - tuple[3] x509.CertificateBuilder the cert builder
    - tuple[4] datetime.datetime issuing date
    - tuple[4] datetime.datetime expiration date
    """
    common_name = data['CommonName']
    days = data.get('Days', 365)
    email = data['Email']
    organization_name = data['OrganizationName']

    self.__current_security_level = \
        self.__get_current_security_level(cert_type)

```

```

curve, curve_str = \
    self.__get_curve(self.__current_security_level)

self.__curve = curve_str

private_key, public_key = self.__gen_keys_pair(curve)

cert_attributes = x509.Name([
    x509.NameAttribute(x509.oid.NameOID.COUNTRY_NAME, 'IT'),
    x509.NameAttribute(x509.oid.NameOID.ORGANIZATION_NAME,
                       organization_name),
    x509.NameAttribute(x509.oid.NameOID.COMMON_NAME,
                       common_name),
    x509.NameAttribute(x509.oid.NameOID.EMAIL_ADDRESS,
                       email),
])

if serial is None:
    serial = gen_random_serial()

issuing_date = datetime.datetime.now(datetime.timezone.utc)
expiration_date = issuing_date + datetime.timedelta(days=days)

builder = x509.CertificateBuilder(
).subject_name(
    cert_attributes
).not_valid_before(
    issuing_date
).not_valid_after(
    expiration_date
).public_key(
    public_key
).serial_number(
    serial
)

return (private_key, public_key, serial, builder,
        issuing_date, expiration_date)

def __gen_keys_pair(self, curve):
    private_key = ec.generate_private_key(
        curve=curve,
        backend=backends.default_backend())
    public_key = private_key.public_key()
    return private_key, public_key

def create_keys_and_cert(self, data, cert_type, serial=None):
    """
    Does the following:
    - generates a key pair using ECDSA
    - generates a certificate for that public key
    - saves to two files the certificate and the private key

    :param data    dict, keys:
    - 'CommonName'  str the 'CommonName' to insert into
    the cert

```

```

-     'Email' str the 'email' to insert into the cert
-     'Days' int the days for which the cert is valid
starting from now
-     'OrganizationName' str the 'OrganizationName' to
insert into the cert
:param cert_type enum of 'CertType'
:param serial str the optional serial to insert into the
certificate.
If 'None', a brand new one is generated using
randomness.

:note 'serial' if is not 'None' should be pseudorandom.

:rtype tuple, as follows:
- tuple[0] = (path-to-cert, path-to-privkey-file)
- tuple[1] = (serial, issuing date, expiration date)

:raises ValueError if 'serial == 1'
"""

if serial is not None and (serial == 1 or serial == '1'):
    raise ValueError('serial cant be = 1')

truncated_name = utils.get_truncated_name(data['CommonName'])

self.__key_file_name = os.path.abspath(
    os.path.join(self.__directory, truncated_name+'.key'))

self.__cert_file_name = os.path.abspath(
    os.path.join(self.__directory, truncated_name+'.crt'))

result = self._basic_cert_setup(data, cert_type, serial)

private_key = result[0]
# public_key = result[1]
serial = result[2]
cert_builder = result[3]
issuing_date = result[4]
expiration_date = result[5]

extensions = None
if cert_type == CertType.server:
    extensions = x509.ExtendedKeyUsage(
        [x509.oid.ExtendedKeyUsageOID.SERVER_AUTH])
elif cert_type == CertType.client:
    extensions = x509.ExtendedKeyUsage(
        [x509.oid.ExtendedKeyUsageOID.CLIENT_AUTH])

cert_builder = cert_builder.add_extension(extensions,
                                          critical=False)

ca_private_key = self.__get_ca_private_key()
ca_cert = self.__get_ca_cert()

cert_builder = cert_builder.issuer_name(ca_cert.subject)

cert = cert_builder.sign(private_key=ca_private_key,
```

```

        algorithm=hashes.SHA512(),
        backend=backends.default_backend())

    ca_private_key = None

    private_key_output = open(self.__key_file_name, 'wb')
    private_key_output.write(private_key.private_bytes(
        encoding=serialization.Encoding.PEM,
        format=serialization.PrivateFormat.TraditionalOpenSSL,
        encryption_algorithm=serialization.NoEncryption()
    ))
    private_key_output.close()
    private_key = None

    self.__write_public_bytes(self.__cert_file_name, cert)

    return (self.__cert_file_name,
            self.__key_file_name), (serial,
                                    issuing_date,
                                    expiration_date)

```

Nel database si memorizzano anche informazioni relative ai certificati, come il CommonName, il seriale, il livello di sicurezza, l'algoritmo di firma. Questa tabella è quindi referenziata dalla relativa tabella che rappresenta i VPN server ed i VPN device client.

Si mantiene anche una tabella con informazioni relative alla CRL, come la data di ultima modifica.

6.3.2 IP Mapping

L'IP Mapping è una funzionalità fondamentale per poter far sì che un VPN server possa gestire il maggior numero possibile di reti target diverse. Durante l'analisi dei requisiti è stato osservato che gli Execution Manager dedicati all'analisi di reti target sono posti ciascuno in una rete isolata rispetto al resto di MoonCloud, ciò ha portato alle seguenti conclusioni:

- è possibile assegnare più volte la stessa rete mappata a diversi client, a patto che siano collegati a VPN server diversi, e quindi Execution Manager.
- E' possibile assegnare *qualsiasi* indirizzo IP, non solo quelli indicati come *privati*, questo perché tali indirizzi sono utilizzati solo nel contesto degli Execution Manager. Per evitare eventuali conflitti, come ad esempio assegnare una rete mappata che contiene l'indirizzo IP di una repository Linux, deve essere possibile poter escludere degli indirizzi, reti, nomi di dominio.

Assegnamento reti

Il grafico 6.2 rappresenta, mediante la notazione UML per i diagrammi di interazione, quali azioni sono svolte per l'assegnamento delle reti, che qui viene descritto a parole.

1. Per ciascuna rete in input da mappare, si crea un corrispondente oggetto (detto “rete canonica”) che ha come subnet mask una subnet mask *classful* in grado di contenere tutti gli indirizzi della rete in input. Ad esempio, se in input vi è una rete con subnet mask a 26 bit, il corrispettivo oggetto è una rete con lo stesso NET ID e con subnet mask a 24 bit.
2. Si raggruppano tutte le reti canoniche per subnet mask.
3. Per ciascun gruppo, si richiede al database un numero di reti mappate pari al numero di reti che costituiscono ciascun gruppo.
4. Si utilizza una funzione (il DBMS PostgreSQL consente di farlo) salvata nel database per questa operazione, poiché si devono effettuare numerose query. Facendo tutto con una funzione nel database, si richiede meno I/O. La funzione garantisce che le reti mappate che vengono infine ritornate non siano nella blacklist. Si noti che grazie ai tipi di dati `INET` e `CIDR`, certe interrogazioni sono molto efficienti (ad esempio esiste un operatore per valutare se un indirizzo IP è contenuto in una rete).
5. Si *allineano* le reti in input con le reti mappate, e le si salvano nel database.
6. Si effettua un secondo allineamento tra le reti mappate e quelli in input, ritornando infine una lista di oggetti che contengono tutte le informazioni per creare il file di script per nftables.

Si noti che nel database si salvano, di fatto, delle coppie Rete Originale – Rete Mappata. Si può vedere un indirizzo IP originale come l’offset tra esso e il NET ID, ed allo stesso modo, il corrispondente indirizzo mappato si calcola sommando l’offset dell’IP originale al NET ID mappato.

La creazione del mapping è abbastanza complessa, si inserisce come codice d’esempio la creazione del file di script per nftables.

```
import ipaddress
from io import StringIO

import cconf.dnmcp.ip_utils as ip_utils

from . import abstract_tables

COMMENT = """\t# map 'mapping' is applied in postrouting for
\t# packets target_net -> mooncloud_net, it changes the
\t# source addresses to the ones expected by mooncloud.

\t# map 'remapping' is applied in prerouting for
\t# packets mooncloud_net -> target_net, it changes the
\t# dest addresses from the mapped ones known by mooncloud
\t# to real ones.

\t# since OpenVPN server does NAT to the VPN, the only
\t# address known here is the VPN subnet."""

class NFTables(abstract_tables.AbstractTables):
    """
```

Class that creates the mapping file for 'nftables'.

The 'shebang' is set to '#!/usr/sbin/nft -f'.
"""

```
def __init__(self, directory, data):
    super().__init__(directory, data, 'nftables.nft')

def _mapping_str(self):
    nftables_initial = StringIO()
    nftables_mapping = StringIO()
    nftables_remapping = StringIO()
    nftables_masquerading = StringIO()

    final_rules = StringIO()

    nftables_initial.write('#!/usr/sbin/nft -f\n')
    nftables_initial.write('\n')

    nftables_initial.write('# creating the new table\n')
    nftables_initial.write('table ip ovpn_nat {\n')

    nftables_mapping.write('\t# map old -> new\n')
    nftables_mapping.write('\tmap mapping {\n')
    nftables_mapping.write('\t\ttype ipv4_addr: ipv4_addr\n')

    nftables_remapping.write('\t# map new -> old\n')
    nftables_remapping.write('\tmap remapping {\n')
    nftables_remapping.write('\t\ttype ipv4_addr: ipv4_addr\n')

    first = True

    # -j MASQUERADE on everything that comes from the VPN
    for address in self._internal_nets_cidr:
        rule = (
            '\t\tip saddr ' + self._vpn_net_cidr + ' ip daddr '
            + address + ' masquerade'
        )
        nftables_masquerading.write(rule+'\n')

    # building the two maps
    for mapping in self._mappings:

        old_net = mapping.old_network
        new_net = mapping.new_network
        count = mapping.counter
        starting_old_net_address =
→ mapping.old_network_starting_address
        starting_new_net_address =
→ mapping.new_network_starting_address

        if isinstance(old_net, str):
            old_net = ip_utils.CustomIPv4Network(old_net)

        if isinstance(new_net, str):
            new_net = ip_utils.CustomIPv4Network(new_net)
```

```

if isinstance(starting_old_net_address, str):
    starting_old_net_address = \
        ipaddress.IPv4Address(starting_old_net_address)

if isinstance(starting_new_net_address, str):
    starting_new_net_address = \
        ipaddress.IPv4Address(starting_new_net_address)

ending_old_address = starting_old_net_address + count - 1
current_old_address = starting_old_net_address
current_remapped_address = starting_new_net_address
i = 1

mapping_element = ''
remapping_element = ''
while current_old_address <= ending_old_address:

    new_addr = current_remapped_address.exploded
    original_addr = current_old_address.exploded

    prefix = '\t\t\t\t\t'
    if first:
        prefix = '\t\t\t\t\t'
        first = False

    if i % 2 == 0 and prefix != '\t\t\t\t\t':
        prefix = ' '

    end = ', '
    if current_old_address == ending_old_address:
        end = '}'

    current_remapping_element = (prefix + new_addr +
                                ' : ' + original_addr + end)
    current_mapping_element = (
        prefix + original_addr + ' : ' + new_addr + end)

    if i % 2 == 0:
        # new line
        mapping_element = (mapping_element +
                           current_mapping_element + '\n')
        remapping_element = (remapping_element +
                              current_remapping_element +
                              '\n')

    nftables_mapping.write(mapping_element)
    nftables_remapping.write(remapping_element)
else:
    # else stay on this line
    mapping_element = current_mapping_element
    remapping_element = current_remapping_element

    # shift to next elements
    mapping_element = current_mapping_element
    remapping_element = current_remapping_element

    current_remapped_address = current_remapped_address + 1

```



```

        current_old_address = current_old_address + 1

        i += 1

        nftables_mapping.write('\t}\n')
        nftables_remapping.write('\t}\n')

    final_rules.write(nftables_initial.getvalue()+'\n')

    final_rules.write(nftables_mapping.getvalue()+'\n')

    final_rules.write(nftables_remapping.getvalue()+'\n')

    # writing the comment
    final_rules.write(COMMENT+'\n\n')

    # declaring chains
    prerouting_chain = (
        '\tchain prerouting {\n' +
        '\t\ttype nat hook prerouting priority 0; policy accept;\n'
↪ +
        '\t\tip saddr ' + self._vpn_net_cidr + ' dnat to ip daddr
↪ map @remapping\n' +
        '\t}\n'
    )

    postrouting_chain = (
        '\tchain postrouting {\n' +
        '\t\ttype nat hook postrouting priority 0; policy
↪ accept;\n' +
        nftables_masquerading.getvalue() +
        '\t\tip daddr ' + self._vpn_net_cidr + ' snat to ip saddr
↪ map @mapping\n' +
        '\t}\n'
    )

    final_rules.write('\t# chains\n')
    final_rules.write(prerouting_chain)
    final_rules.write(postrouting_chain)

    # the last newline is important
    # nft will signal an error if it's not present.
    final_rules.write('}\n')

    return final_rules.getvalue()

```

Ritornare indirizzo IP mappato

Quando un client specifica un target per un'analisi, egli lo fa inserendo l'indirizzo IP originale, per lui la questione dell'IP mapping è completamente trasparente. Ciò significa che occorre una funzione che, dato un indirizzo IP originale di un certo VPN client, ritorni quello mappato, poiché esso è l'unico noto a MoonCloud. Tale funzione viene implementata dal microservizio, ed è molto performante. I passi da compiere sono:



Figura 6.2: Diagramma di interazione che mostra le chiamate tra le vari classi che collaborano per assegnare nuove reti mappate all’aggiunta di un nuovo client (altre azioni, come la creazione dei file di configurazione vengono omesse). La classe HLDB si occupa dell’interazione con il database, mentre DNMCP compie operazioni ad un più alto livello.

- fare una query al database e ritornare la rete mappata cui corrisponde la rete originale a cui appartiene l’indirizzo IP richiesto in input. Anche in questo caso si sfruttano gli operatori specifici messi a disposizione dal DBMS.
- Il corrispondente IP mappato si calcola con i seguenti step:
 - applicare la subnet mask al NET ID originale ed all’IP originale, la subnet mask è memorizzata nel database.
 - Applicare la subnet mask al NET ID mappato o al primo indirizzo IP della rete mappata in caso non sia il NET ID (ad esempio: il mapping parte da 192.168.100.10 anziché 192.168.100.0).
 - Calcolare l’offset dell’indirizzo IP originale sottraendo l’IP originale con la subnet mask applicata al NET ID originale con la subnet mask applicata.
 - Sommare l’offset all’indirizzo IP mappato di partenza con la subnet mask applicata.

Le operazioni potrebbero essere effettuate anche senza l’applicazione della subnet mask, si tenga comunque conto che applicare una subnet mask ad indirizzo IP equivale ad un AND logico, quindi un’istruzione in ogni caso molto veloce.

6.3.3 Trasferimento file

Vi sono diverse situazioni che richiedono il trasferimento di file verso i VPN server di MoonCloud. Qualsiasi sia il caso, esso viene effettuato usando il protocollo SSH, mediante il quale si possono sia inviare comandi remoti o trasferire file con il sottosistema SFTP – Secure File Transfer Protocol. Si sfruttano delle librerie

Python a tale scopo. L'autenticazione viene fatta mediante chiave pubblica. Il trasferimento è richiesto nelle seguenti situazioni:

Creazione di un nuovo server Si trasferiscono sul server il file di configurazione principale di OpenVPN, la relativa chiave privata e certificato, la chiave pubblica della CA, la CRL. Vengono trasferiti anche due script:

- `move_files_server.py`: dopo aver trasferito i file appena elencati in una cartella sul server, viene lanciato questo script, il quale legge il file di configurazione principale e da esso deduce la struttura di directory e file richiesta, e quindi la crea. Poiché le operazioni che lo script deve compiere non sono poche, si è preferito scegliere questa strada anziché invocare direttamente *n* comandi lungo la connessione SSH per ridurre l'I/O e quindi aumentare le prestazioni.
- `deleteclient.py`. Quando si revoca un client, esso deve essere *totalmente eliminato*, ciò si traduce anche nell'eliminare ogni riferimento ad esso dai file `client-up.sh` e `client-down.sh`, quindi eliminare il corpo degli `if` all'interno dei due file. Questa operazione viene svolta direttamente sui server, mediante l'invocazione di questo script. Analogamente a quanto detto per lo script precedente, e a maggior ragione in questo caso, eseguire `deleteclient.py` direttamente sul server riduce di molto l'I/O: se non si fosse scelta questa opzione sarebbe stato necessario trasferire i due file, modificarli, e di nuovo caricarli sul server.

Creazione di un nuovo client E' necessario creare un file con lo stesso nome del `CommonName` presente nel certificato del client, il cui contenuto è la direttiva `"iroute"`⁷. Esso deve essere quindi trasferito in una cartella specifica nel VPN server. Oltre a tale file, è necessario modificare gli script `client-up.sh` e `client-down.sh`, aggiungendo un nuovo ramo `if` specifico per questo client.

Rinnovo certificato server L'unico trasferimento da effettuare è il nuovo certificato e chiave pubblica, i quali devono essere spostati nella directory specificata, ancora una volta, nel file di configurazione di OpenVPN nel server. Rimane comunque la necessità di riavviare il server affinché questi cambiamenti abbiano effetto.

Rinnovo certificato client E' necessario revocare il certificato precedente, quindi propagare la nuova CRL ad ogni server di MoonCloud.

Revoca certificato client Occorre aggiornare e distribuire la CRL ed invocare `deleteclient.py` sul server a cui quel client si collegava (oltre ad eliminare i dati inerenti al client dal database).

Refresh CRL Quando si crea una CRL si specifica la data di prossimo aggiornamento, ed essa viene controllata da OpenVPN server: se risulta scaduta non

⁷Si rimanda al capitolo dedicato alle configurazioni di OpenVPN.

si accettano nuove connessioni. Per questa ragione è importante aggiornarla, ovvero creare una nuova CRL che contenga gli stessi certificati revocati della precedente ma con data di prossimo aggiornamento posticipata di un anno.

Il trasferimento dei file verso i server è una parte fondamentale del microservizio, pertanto deve essere il più possibile robusto. Il modo in cui viene effettuato è stato chiamato *asynchronous transferring*, perché è svolto da due thread specifici a questo scopo, separati dagli altri thread di esecuzione, implementati dalla classe `SSHBackgroundWorker`. Il modulo `controllers` organizza i trasferimenti da effettuare e crea degli oggetti (*dizionari* Python) e li deposita su una delle due code condivise con i thread di trasferimento. La computazione di `SSHBackgroundWorker` è composta da due loop (uno per ogni thread), dentro il quale si estraggono elementi dalla coda: ciascun elemento estratto contiene tutte le informazioni che servono per trasferirlo sul server (o sui server) correttamente. I trasferimenti quindi sono eseguiti serialmente, nell'ordine con cui sono stati inseriti in una delle due code (*FIFO*). Ogni volta che si deposita un nuovo job sulla coda, si riceve un `WorkID`, il quale è generato in maniera pseudocasuale allo scopo di identificare univocamente ogni job.

Lo stato della computazione di un lavoro è mantenuto in memoria da Redis. Tra le varie informazioni che si memorizzano vi sono:

- ID del lavoro (è la Key)
- stato di avanzamento: non iniziato ("Pending"), in corso ("Working"), concluso ("Executed"), concluso con errore ("Error")
- tipo (es: *trasferimento server*, *rinnovo certificato*, ecc...)
- ulteriori informazioni, come una descrizione dell'errore in caso si verifichi.

Quando un thread inizia la computazione per un job modifica lo stato da `Pending` a `Working`, infine ad `Executed` quando è finito.

Inizialmente si utilizzava, al posto di Redis, un dizionario acceduto concorrentemente dai thread, tuttavia questo richiedeva un elevato uso di meccanismi di lock. Si è deciso quindi di passare a Redis, il quale, in quanto database di tipo Key-Value, è molto efficiente, inoltre tutte le operazioni svolte da esso sono atomiche per definizione. Inoltre, per le interrogazioni più complesse, è possibile definire degli script Lua e richiamarne quindi la loro esecuzione; più avanti se ne mostra un esempio.

Una volta che il job è stato depositato in una coda dal `controllers`, si ritorna immediatamente la risposta HTTP, tale risposta contiene anche lo `WorkID`. E' responsabilità del chiamante fare quindi del *polling* al microservizio per verificare se il task si è concluso. Tali richieste si traducono in una interrogazione a Redis.

Quando si richiede lo stato di un lavoro ed esso è stato completato, viene rimosso da Redis.

La ragione per cui il trasferimento segue questo paradigma non è prestazionale, bensì è per garantire l'integrità dei file sui server. Si pensi ad un semplice esempio, per cui si fanno due richieste a questo microservizio nello stesso momento, ed entrambe richiedono di aggiungere un nuovo client allo stesso server.

Si supponga che vi siano due thread, ciascuno che gestisce una delle due risposte. Essi quindi accedono al file `client-down.sh` (e `client-up.sh`) sul server, lo modificano aggiungendo informazioni relative solo al proprio client, quindi il primo thread trasferisce il file, immediatamente dopo il secondo trasferisce la propria versione, ed ecco che la modifica fatta dal primo viene sovrascritta.

Un altro problema a cui si può pensare è il seguente: si fa una richiesta di revoca di un certificato, la CRL viene quindi modificata ed inizia la propagazione verso tutti i server. Poi si fa una richiesta di refresh, quindi la si ricrea ed inizia la distribuzione... Qua c'è il problema. Se si suppone che in totale vi siano 100 server e che la seconda richiesta sia arrivata mentre si concludeva il trasferimento verso il 50esimo, a quel punto si modifica la CRL e quella trasferita al 51esimo è diversa dalle precedenti.

Un'esecuzione seriale mette al sicuro da questi problemi. Per ciò che concerne le modifiche alla CRL, esse stesse sono schedata in maniera seriale, non solo il suo trasferimento.

Inizialmente tutte le operazioni venivano eseguite da un unico thread, successivamente se ne è aggiunto un secondo.

- `Main_worker_thread` si occupa del trasferimento di nuovi server, nuovi client e, parzialmente, della revoca di un client chiamando lo script di cancellazione `deleteclient.py`. Si noti che questo thread è l'unico flusso di computazione che può modificare i file `client-up.sh` e `client-down.sh`.
- `CRL_worker_thread` è responsabile dell'aggiornamento e della propagazione della CRL ai diversi server. Anche in questo caso, vi è un unico flusso che modifica un file, per cui l'integrità della CRL è ancora garantita.

L'unica operazione definibile problematica poiché coinvolge entrambi i due thread è la revoca di un client, poiché occorre sia modificare i file `client-up.sh` e `client-down.sh` sia aggiornare la CRL. In questo caso la soluzione adottata consiste nel dividere il lavoro in entrambi i thread, il primo si occupa solo di chiamare `deleteclient.py`, il secondo di aggiornare e distribuire la CRL. Le strutture dati memorizzate da Redis sono organizzate in modo da poter tener conto del progresso parziali di ciascun thread.

Di seguito si mostra un estratto di `SSHBackgroundWorker`, in particolare si mostrano i due loop eseguiti dai due thread.

```
class SSHBackgroundWorker(object):

    def __init__(self):

        self.__main_queue = queue.Queue()
        self.__main_conn = conns.ConnManager()
        self.__main_worker_thread = threading.Thread(
            target=self.__main_loop_func)

        self.__crl_queue = queue.Queue()
        self.__crl_conn = conns.ConnManager()
        self.__crl_worker_thread = threading.Thread(
            target=self.__crl_loop_func)
```

```

self.__thread_number = 2

self.__redis_conn = redis_conn.RedisConn(
    threads_number=self.__thread_number)

def __main_loop_func(self):
    loop = True
    while loop is True:
        work = self.__main_queue.get()
        if work is not None:

            work_type = work['work_type']
            work_id = work['work_id']
            self.__work_pre(work_id)
            result = None

            if work_type == status.WorkType.transfer_client.value:
                result = self.__transfer_client(work)
            elif work_type ==
↪ status.WorkType.transfer_server.value:
                result = self.__transfer_server(work)
            elif (work_type == status.WorkType.renew_server.value):
                result = self.__renew_server_cert(work)
            elif work_type == status.WorkType.revoke_client.value:
                result = self.__deleteclient(work)

            if result is not None:
                self.__work_post(work_id, result)

        else:
            loop = False

def __crl_loop_func(self):
    loop = True
    while loop is True:
        work = self.__crl_queue.get()
        if work is not None:

            work_type = work['work_type']
            work_id = work['work_id']

            self.__work_pre(work_id)

            if status.is_crl_str(work_type):
                result = self.__update_crl(work)
                self.__work_post(work_id, result)
            else:
                loop = False

def __work_post(self, work_id, result):

    if result['is_error']:
        if isinstance(result, tuple):
            error_str = str(result[1])
        else:
            error_str = result
        self.__redis_conn.set_work_status(

```

```

        work_id, status.WorkStatus.error,
        error_str)

    def __work_pre(self, work_id):

        self.__redis_conn.set_work_status(work_id,
↪ status.WorkStatus.working)

```

Il prossimo codice presentato è uno script Lua che viene eseguito su Redis⁸. E' utilizzato per ritornare, in una sola query a tale database, l'intera lista dei job. Senza tale script, sarebbe stato necessario fare una prima query per ottenere la lista degli WorkID, poi, per ciascuno di essi, richiedere l'oggetto completo.

```

-- argument passed to the script
-- "true" if the script has to remove
-- completed works.
local remove_if_done = tostring(KEYS[1])

-- list of WorkIDs
local keys = redis.call("KEYS", "*")

local result = {}

-- iterating over the list
for _, key in ipairs(keys) do
    -- getting the full object
    local value = redis.call("HGETALL", key)
    local current_work = {}

    -- parsing the result
    for index = 1, #value, 2 do
        local field_name = value[index]
        local field_value = value[index + 1]

        current_work[field_name] = field_value

        -- if have to remove, and it's finished then
        -- delete it
        if remove_if_done == "true" then
            if field_name == "Status" and field_value == "Executed"
↪ then
                redis.call("DEL", key)
            end
        end
        result[key] = current_work
    end

-- encoding the result
return cjson.encode(result)

```

⁸<https://www.lua.org/>



Figura 6.3: Diagramma di attività: trasferimento file. Il presente diagramma UML mostra cosa succede quando è necessario trasferire dei file. Ad una generica richiesta arrivata a `controllers`, esso richiede di aggiungere un lavoro. Si decide quindi su quale coda depositarlo in base al tipo, quindi si ritorna al chiamante. Parallelamente, i due thread di trasferimento svolgono il lavoro.

6.3.4 Registrazione server

Registare un nuovo server significa che è stata già deployata in MoonCloud una VM dedicata esclusivamente ad essere un VPN server, ed esso è raggiungibile anche dal Docker container su cui si trova il microservizio MoonCloud_VPN. Viene messa a disposizione una API per questo scopo; i passi per creare un server sono:

1. verificare che la chiave SSH fornita sia valida
2. creare una nuova istanza nel database per il nuovo server
3. creare i certificati ed i file di configurazione
4. registrare nel database le informazioni relative al nuovo certificato
5. mettere sulla coda di trasferimento un nuovo job, ovvero quello di trasferire sul nuovo server tutti i file necessari.

L'estratto di codice che si presenta ora è una versione leggermente modificata di ciò che controllers fa.

```
@transaction.atomic
def create_server(input_data):
    """
    The function used to create a new server.

    :param input_data: dict
    :rtype tuple: (directory-in-wich-files-will-be, work_id,
                  server.id, server.conf)
    """

    is_key_valid = sshclient.is_key_valid(
        private_key=input_data['SSHPrivateKey'],
        is_from_file=False,
        private_key_passphrase=None,
        key_algo=input_data['SSHKeyAlgorithm']
    )

    if not is_key_valid:
        raise paramiko.ssh_exception.SSHException(WRONG_SSH_KEY)

    directory, work_id = misc_ops.create_temp_directory_work_id()

    chacha_supported = is_chacha_supported()

    try:
        server_vpn_net = ipaddress.IPv4Network(
            input_data['VPNVirtualNetID'] +
            '/' + input_data['VPNVirtualMask']
        )

        server = models.Server(
            public_host_name=input_data['publicHostName'],
            public_port=input_data['publicPort'],
            internal_ip=input_data['internalIP'],
            vpn_net=server_vpn_net,
```

```

ssh_username=input_data['SSHUsername'],
ssh_port=input_data['SSHPort'],
ssh_private_key=input_data['SSHPrivateKey'],
ssh_key_algorithm=input_data['SSHKeyAlgorithm']
)

create_server_in = {
    'ServerName': input_data['publicHostName'],
    'SupportChaCha': chacha_supported,
    'ServerPort': input_data['publicPort'],
    'VPNNet': {
        'NetID': input_data['VPNVirtualNetID'],
        'Mask': input_data['VPNVirtualMask'],
    }
}

# creating the main configuration file.
server_conf = createserver.ServerConf(
    directory,
    create_server_in
)

# dict that contains the paths used by the server.
server_dst_paths = server_conf.get_paths()

server.private_key_path = server_dst_paths['key_path']
server.public_key_path = server_dst_paths['cert_path']

# effectively creates the file.
server_conf.create_file()

cert_res = cert_ops.generate_server_cert(
    directory,
    input_data['publicHostName'], email=input_data['email'])

creation_info = cert_res[0]
keys_info = cert_res[1]

server_cert_paths = creation_info[0]

serial = creation_info[1][0]
issuing_date = creation_info[1][1]
expiration_date = creation_info[1][2]

security_level = keys_info[0]
curve = keys_info[1]

# certificate model
cert = models.CertInfo(
    email=input_data['email'],
    security_level=security_level,
    algorithm=curve,
    certificate_serial=serial,
    issuing_date=issuing_date,
    expiration_date=expiration_date,
    common_name=input_data['publicHostName']
)

```

```

cert.save()

server.base_per_client_dir_path = server_dst_paths[
    'base_ccd_path']
server.client_up_script_file_path = server_dst_paths[
    'client_up_path']
server.client_down_script_file_path = server_dst_paths[
    'client_down_path']

server.crl_file_path = server_dst_paths['crl_path']

server.vpn_nic = server_conf.get_device_name()

server.certificate = cert
server.save()

work = misc_ops.get_create_server_work(
    directory=directory,
    server=server,
    server_cert_paths=server_cert_paths,
    server_conf=server_conf,
    server_dst_paths=server_dst_paths,
    transferCA=input_data['transferCA']
)
global ssh_worker
misc_ops.add_host(ssh_worker, server)

ssh_worker.put_work(work, work_id=work_id)
return (directory, work_id, server.id, server_conf)

except Exception as e:
    __shutil_rmtree(directory)
    raise e

```

Alla fine, la API ritorna al chiamante l'ID del server che lo identifica univocamente nel database ed il WorkID relativo al trasferimento dei file. E' responsabilità del chiamante fare ulteriori richieste per verificare lo stato del trasferimento. Per farlo viene messa a disposizione una API specifica.

6.3.5 Registrazione client

Una API REST è predisposta alla creazione di un nuovo VPN device client. Tra gli input che occorre fornire, è particolarmente importante specificare l'ID del server a cui il client si conatterà e l'elenco delle reti che il client sarà in grado di raggiungere una volta portato nella rete target. Si compiono i seguenti step:

1. fare un refresh della lista di nomi di dominio da escludere dal mapping
2. creare una nuova istanza nel database per il device client
3. creare i certificati ed i file di configurazione
4. definire il mapping

5. creare il file di script per nftables
6. mettere sulla coda di trasferimento un nuovo job di tipo “Trasferire Client”.

Si ritorna al chiamante l’ID del client, il WorkID ed un file zippato codificato in formato base64 che contiene:

- file di configurazione principale per OpenVPN
- certificato e chiave privata del VPN client
- chiave pubblica della CA

Anche in questo caso si mostra un esempio.

```
@transaction.atomic
def create_client(input_data):
    """
    Creates a new client.

    That means:
    - creating config files
    - creating a new pair of cryptographic keys
    - registering a new mapping
    - moving necessary to the server which this client is
      registered to.

    The configuration files are immediately returned as a
    zipped-then-base64ed file, you'll get a work id too, necessary
    to handle the moving of files to the server.
    """
    company = input_data['company']
    identifier = input_data['identifier']

    # first thing to do is to update dns
    dns_worker = dnsworker.DNSWorker()

    event_loop, requests = dns_worker.update_all_no_wait()

    full_name = utils.get_full_name(company, identifier)

    directory, _ = misc_ops.create_temp_directory_work_id()

    chacha_supported = is_chacha_supported()

    try:

        # getting the related server instance
        server = models.Server.objects.get(pk=input_data['idServer'])

        cert_res = cert_ops.generate_client_cert(
            directory, full_name,
            company, input_data['email'])

        creation_info = cert_res[0]
        keys_info = cert_res[1]
```

```

serial = creation_info[1][0]
issuing_date = creation_info[1][1]
expiration_date = creation_info[1][2]

# keys_info = client_openssl.keys_info
security_level = keys_info[0]
curve = keys_info[1]

cert = models.CertInfo(
    email=input_data['email'],
    security_level=security_level,
    algorithm=curve,
    certificate_serial=serial,
    issuing_date=issuing_date,
    expiration_date=expiration_date,
    common_name=full_name,
)

cert.save()

pair = creation_info[0]

# creating the client model instance
client = models.Client(
    # common_name=full_name,
    company=company,
    identifier=identifier,
    certificate=cert
)

client.save()

pair = creation_info[0]

create_client_in = {
    'SupportChaCha': chacha_supported,
    'ClientName': full_name,
    'ServerName': server.public_host_name,
    'ServerPort': server.public_port,
    'ServerCertName': server.certificate.common_name,
}

# copying the move-files.sh into the directory
# in which we currently are.

# this can be used on the client-side to move OpenVPN
# files to the correct locations.
move_script_file_name = os.path.join(directory,
↪ 'move-files.sh')

shutil.copyfile(settings.MOVE_SCRIPT_FILE_CLIENT,
                move_script_file_name)

# we need the ca.crt too
dest_ca = os.path.abspath(os.path.join(directory, 'ca.crt'))
shutil.copyfile(settings.ROOT_CA_CERT, dest_ca)

```

```

# getting the mapper instance.
db = hlddb.HLDb()
dnmcp = dnmcp4.DNMCP4(database_conn=db)

nets_to_remap = input_data['internalNets']

# now waiting the dns resolver
dns_worker.wait_multi(event_loop, requests)

mappings = dnmcp.create_mapping(
    server=server,
    client=client,
    old_nets=nets_to_remap)

add_client_in = {
    'ServerVirtualIP': server.get_server_vpn_ip_address(),
    'ClientName': full_name,
    'InternalNets': [remapped.old_network for remapped in
↪ mappings],
    'ServerVirtualNICName': server.vpn_nic,
}

a_client = addclient.AddClient(
    directory,
    add_client_in
)

a_client.create_file()

work = misc_ops.get_create_client_work(
    directory=directory,
    server=server,
    add_client=a_client,
    client_full_name=full_name
)

global ssh_worker
ssh_worker.put_work(
    work_id=client.id,
    work=work
)

c_client = createclient.ClientConf(
    directory,
    create_client_in
)

c_client.create_file()

# passing the mapping to the *Tables handler.
xptables_remapping = mappings

xtables_in = {
    'ClientName': full_name,
    'VPNNet': {
        'NetID': server.vpn_net.exploded,

```

```

        'Mask': server.vpn_net.netmask.exploded,
    },
    'InternalNets': input_data['internalNets'],
    'Remapping': xptables_remapping
}

client_xtables = nftables.NFTables(directory, xtables_in)

client_xtables.create_file()

zip_file = zipper.Zipper(
    directory=directory,
    zipfile_name=full_name+'.zip'
)

files_to_add = [
    client_xtables.file_name,
    c_client.file_name,
    pair[0],
    pair[1],
    dest_ca,
    move_script_file_name,
]

for file_to_add in files_to_add:
    zip_file.add_file(file_to_add)

zip_file.finalize()

return (directory, zip_file.zip_abs_path, client.id)
except Exception as e:
    __shutil_rmtree(directory)
    raise e

```

6.4 API

In questa sezione si descrivono le API REST messe a disposizione da MoonCloud_VPN. Input ed output sono descritti senza specificare l'esatta sintassi, poiché è fuori dallo scopo di questo documenti fornire una documentazione delle API. Tutti gli input e gli output sono in formato JSON.

Creazione server POST /server

- Descrizione: mediante questa API si creano tutte le configurazioni necessarie per un nuovo VPN server. Tutti i file che servono vengono trasferiti sul server mediante SSH.
- Input: un oggetto con i seguenti campi:
 - nome DNS da inserire nel certificato ed ulteriori informazioni (es: per il campo Email)
 - porta di ascolto OpenVPN
 - NET ID e subnet mask del tunnel VPN

- credenziali SSH, compresa la porta di ascolto
- Output: l'ID del server assegnato dal database ed il WorkID del lavoro di trasferimento.

Stato creazione server GET /server/creation/<work-id>

- Descrizione: viene utilizzata per controllare se il trasferimento dei file per la creazione di un nuovo server è stato completato.
- Input: nessuno
- Output: un oggetto JSON che riporta lo stato del trasferimento, il tipo di job, in questo caso di tipo TransferServer, il WorkID.

Dettagli server GET /server/<server-id>

- Descrizione: ritorna tutte le informazioni memorizzate relative ad un certo server.
- Input: nessuno
- Output: oggetto JSON che riporta le seguenti informazioni:
 - ID
 - nome DNS e porta OpenVPN di ascolto
 - indirizzo IP interno mediante il quale è raggiungibile
 - alcuni path della configurazione di OpenVPN
 - NET ID e subnet mask del tunnel VPN
 - informazioni sul certificato, tra cui data di firma, data di scadenza, numero seriale ed algoritmo di firma.

Rinnovo certificato server PUT /server/<server-id>/renew

- Descrizione: i certificati hanno una scadenza, ed una volta scaduti non sono più validi e quindi non è più possibile effettuare il collegamento VPN, pertanto è necessario rinnovarli periodicamente.
- Input: nessuno
- Output: il WorkID relativo al trasferimento del certificato e della chiave privata sul server in questione.

Stato rinnovo certificato server GET /server/renew/<work-id>

- Descrizione: utilizzata per verificare lo stato del trasferimento verso il server del nuovo certificato e chiave privata.
- Input: nessuno
- Output: stato del trasferimento, tipo, WorkID.

Creazione client POST /client

- Descrizione: si chiama questa API per creare un nuovo client. Il micro-servizio crea tutti i file di configurazione, registra un mapping, trasferisce sul server designato i file necessari per poter stabilire un collegamento con esso.

- **Input:** un oggetto JSON che deve contenere i seguenti campi:
 - ID server a cui il client si conatterà
 - nome dell'azienda cliente a cui il device andrà
 - nome mnemonico con cui identificare il device (es: `office1`); assieme al nome dell'azienda andrà a comporre il `CommonName` del certificato
 - email da inserire nel certificato
 - lista di reti raggiungibili dal device
- **Output:** un oggetto JSON costituito da tre campi, l'ID del device client all'interno del database, il `WorkID`, uno zip file in formato base64 contenente tutti i file che devono essere poi trasferiti sul dispositivo, unitamente ad uno script che automatizza la creazione della struttura di directory assunta da OpenVPN.

Stato creazione client GET `/client/creation/<work-id>`

- **Descrizione:** analogamente ad ogni altra API relativa ad ottenere lo stato di un trasferimento, questa viene utilizzata per verificare quando i file relativi ad un nuovo client sono stati spostati sul server.
- **Input:** nessuno a parte la URI in sé; si noti che solo in questo caso il `WorkID` equivale all'ID del client ritornato al momento della creazione.
- **Output:** informazioni sullo stato del trasferimento.

Dettagli client GET `/client/<client-id>`

- **Descrizione:** mediante questa API si ottengono informazioni relative ad un certo VPN client.
- **Input:** nessuno
- **Output:** un oggetto JSON con vari campi tra cui:
 - ID
 - nome azienda e nome mnemonico
 - informazioni relative al certificato del client, tra cui data di firma, data di scadenza, algoritmo, livello di sicurezza.

Rinnovo certificato client PUT `/client/<client-id>/renew`

- **Descrizione:** come per il certificato del server, anche quello del client deve essere sempre valido, altrimenti il server rifiuterà la connessione VPN. Questa API serve a creare un nuovo certificato valido e contemporaneamente a revocare il precedente, distribuendo la nuova CRL a tutti i server.
- **Input:** nessuno
- **Output:** lo `WorkID` del trasferimento ed uno zip file in base64 contenente la nuova chiave privata e certificato.

Stato rinnovo certificato client GET `/client/renew/<work-id>`

- Descrizione: viene utilizzata per verificare lo stato del trasferimento della CRL verso tutti i server in seguito al rinnovo di un certificato client.
- Input: nessuno.
- Output: informazioni sullo stato del trasferimento.

Revoca client DELETE /client/<client-id>/

- Descrizione: per numerose ragioni, tra cui il semplice fatto di non servire più, è necessario dover cancellare un VPN client. Tra le azioni coinvolte, oltre a cancellare vari record dal database, occorre revocare il certificato usato da tale client, e propagare la nuova CRL a tutti i server.
- Input: nessuno
- Output: lo `WorkID` relativo alla propagazione della CRL.

Stato revoca client GET /revocation/<work-id>

- Descrizione: si usa questa API per verificare lo stato del trasferimento della CRL verso i VPN server in seguito alla cancellazione di un client.
- Input: nessuno
- Output: informazioni sullo stato del trasferimento.

Ottenimento IP mappato GET /client/<client-id>/mapping

- Descrizione: questa API implementa una delle funzionalità più importanti, ovvero fornire la versione mappata di un indirizzo IP originale per un certo VPN client.
- Input: il body della richiesta prevede un oggetto JSON contenente come unico campo l'IP richiesto.
- Output: un oggetto JSON composto dall'IP originale e dall'IP mappato.

Aggiunta di un'esclusione POST /blacklist/add

- Descrizione: è necessario poter definire delle reti o indirizzi IP (o nomi di dominio tradotti poi in IP) che non devono essere mai utilizzati come reti mappate. Mediante questa API è possibile aggiungere nuove esclusioni alla blacklist.
- Input: un oggetto JSON con diverse combinazioni, tra cui un singolo indirizzo IP, una rete (NET ID e subnet mask), un nome di dominio. Vi è anche un campo `isInternal` per specificare se quell'esclusione è relativa a MoonCloud (ad esempio, si vuole escludere l'indirizzo IP che contiene la repository Docker).
- Output: un oggetto JSON con gli stessi campi dell'input ed in più l'ID assegnato dal database a quella particolare esclusione.

Elenco blacklist GET /blacklist/all

- Descrizione: si utilizza questa API per visualizzare l'intera blacklist.
- Input: nessuno
- Output: si ritorna un array di oggetti JSON in cui ciascun oggetto rappresenta un'esclusione, tra i vari campi si mostra anche l'ID.

Aggiornare blacklist PUT /blacklist/update

- Descrizione: i nomi di dominio salvati nella blacklist devono essere aggiornati per riflettere i cambiamenti nell'associazione indirizzo IP – nome DNS. Si noti che questo aggiornamento è fatto anche ogni volta che si crea un nuovo client, per cui si può presumere che quest'API non sarà chiamata spesso.
- Input: nessuno
- Output: un oggetto JSON con i seguenti campi:
 - una lista di dei nomi DNS aggiornati
 - una lista dei nomi DNS che non sono stati aggiornati a causa di errori
 - una descrizione degli errori incontrati durante la risoluzione.

Vedere specifiche esclusioni GET /blacklist/dns/internal|external|all

- Descrizione: questa API è stata pensata appositamente per visualizzare solo le esclusioni che hanno un nome DNS registrato. Le si possono ritornare tutte ("all"), solo quelle esterne ("external"), oppure solo quelle interne ("internal").
- Input: nessuno
- Output: una lista di oggetti JSON, per ciascuno si mostra il nome DNS, se è una esclusione interna o no, e l'ID.

Dettagli esclusione GET /blacklist/<blacklist-id>

- Descrizione: utilizzata per visualizzare una particolare esclusione dalla blacklist, dato il suo ID.
- Input: nessuno
- Output: un oggetto JSON con tutte le informazioni relative all'esclusione.

Cancellare esclusione DELETE /blacklist/<blacklist-id>

- Descrizione: mediante quest'API si cancella una particolare esclusione.
- Input: nessuno
- Output: nessuno

Specificare il supporto a ChaCha20 PUT /chachasupport/true|false

- Descrizione: l'algoritmo di cifratura ChaCha20 è supportato solo in alcune versioni di OpenVPN a seconda di come sia stato compilato. Questa API presuppone che, ad esempio, da un certo punto in poi tale algoritmo sia sempre supportato sui nuovi client e server, e che si possa specificare tale supporto mediante questa API senza dover riavviare il microservizio (poiché il valore di default è specificato nei settaggi).
- Input: nessuno
- Output: nessuno

Refresh CRL PUT /crl

- Descrizione: tra i vari campi che si inseriscono in una CRL vi è "NextUpdate", ovvero per quando ci si aspetta il prossimo aggiornamento. OpenVPN, nel controllo della CRL, verifica anche il valore di questo campo, e se la CRL non è aggiornata il server rifiuterà nuove connessioni, pertanto è importante mantenerla aggiornata. In questo caso si genera una nuova CRL con gli stessi certificati revocati della precedente, ma con data di NextUpdate posticipata di un anno. Dopo aver generato una nuova CRL, viene distribuita a tutti i server.
- Input: nessuno
- Output: lo WorkID relativo alla distribuzione della CRL a tutti i VPN server di MoonCloud.

Stato refresh CRL GET /crl/refresh/<work-id>

- Descrizione: si usa l'API in questione per vedere lo stato del trasferimento della CRL ai server in seguito ad un refresh.
- Input: nessuno
- Output: nessuno

Ultimi aggiornamenti alla CRL GET /crl

- Descrizione: questa API ritorna una lista degli ultimi dieci aggiornamenti fatti alla CRL. I dati vengono prelevati da un'apposita tabella dal database, la quale è aggiornata solo dopo che la CRL modificata è stata distribuita a tutti i server.
- Input: nessuno
- Output: un array JSON in cui ciascun oggetto rappresenta un aggiornamento. Per ciascun item dell'array i campi sono la data di aggiornamento e la ragione ("refresh" o "revocation" di un client).

Far ripartire un job PUT /<work-id>

- Descrizione: vi sono molte ragioni per cui un work di trasferimento può terminare con un errore, tra cui un problema di connettività. Per situazioni come queste, in cui per problemi che poi sono stati risolti non è stato possibile completare un trasferimento, si è pensata questa

API. Dopo aver verificato che un trasferimento non è andato a buon fine, e dopo aver risolto l'errore (se possibile), si può far ripartire il job. Esso sarà rimesso sulla coda come lavoro più recente.

- Input: nessuno
- Output: nessuno

Elenco job GET /all-works

- Descrizione: oltre a fare del polling per ogni singolo job, può essere più veloce utilizzare questa API per vedere l'elenco di tutti i job in corso, compresi quelli terminati di cui non si è ancora verificato lo stato, quelli in corso, quelli conclusi con errore.
- Input: nessuno
- Output: un array JSON contenente oggetti ciascuno nell'esatto formato ritornato dalle API relative a vedere lo stato di un job. Tutti i job completati e ritornati sono rimossi, pertanto non sarà più possibile vedere il loro stato in un secondo momento.

Bibliografia

- [1] M. Anisetti et al. «A semi-automatic and trustworthy scheme for continuous cloud service certification». In: *IEEE TRANSACTIONS ON SERVICES COMPUTING* (2017). DOI: 10.1109/TSC.2017.2657505.
- [2] M. Anisetti et al. «Modeling time, probability, and configuration constraints for continuous cloud service certification». In: *COMPUTERS & SECURITY* 72 (2018), pp. 234–254. DOI: 10.1016/j.cose.2017.09.012.
- [3] Elaine B Barker. *SP 800-57. Recommendation for Key Management, Part 1: General*. Rapp. tecn. Gaithersburg, MD, United States, 2016.
- [4] Karthikeyan Bhargavan e Gaëtan Leurent. «On the Practical (In-)Security of 64-bit Block Ciphers». In: *ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS'16)*. 2016. URL: https://sweet32.info/SWEET32_CCS16.pdf.
- [5] Cisco. *Cisco AnyConnect Secure Mobility Client*. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/security/anyconnect-secure-mobility-client/index.html#~stickynav=1>.
- [6] L. Daniel, E. Poll e J. de Ruiter. «Inferring OpenVPN State Machines Using Protocol State Fuzzing». In: *2018 IEEE European Symposium on Security and Privacy Workshops (EuroS PW)*. Apr. 2018, pp. 11–19. DOI: 10.1109/EuroSPW.2018.00009.
- [7] Debian Administrator. «Setting up a Layer 3 tunneling VPN with using OpenSSH». 2017. URL: https://debian-administration.org/article/539/Setting_up_a_Layer_3_tunneling_VPN_with_using_OpenSSH.
- [8] Jason A. Donenfeld. «WireGuard: Next Generation Kernel Network Tunnel». In: *24th Annual Network and Distributed System Security Symposium, NDSS 2017, San Diego, California, USA, February 26 - March 1, 2017*. The Internet Society, 2017. URL: <https://www.ndss-symposium.org/ndss2017/ndss-2017-programme/wireguard-next-generation-kernel-network-tunnel/>.
- [9] Justin Ellingwood. *A Deep Dive into Iptables and Netfilter Architecture*. 2015. URL: <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/a-deep-dive-into-iptables-and-netfilter-architecture>.
- [10] Tomas Jonsson. *Latency and throughput comparison between iptables and nftables at different frame and rule-set sizes*. 2018.

- [11] A. Langley, M. Hamburg e S. Turner. *Elliptic Curves for Security*. RFC 7748. RFC Editor, gen. 2016.
- [12] Microsoft. *[MS-SSTP]: Secure Socket Tunneling Protocol (SSTP)*. 2017. URL: [https://winprotocoldoc.blob.core.windows.net/productionwindowsarchives/MS-SSTP/\[MS-SSTP\].pdf](https://winprotocoldoc.blob.core.windows.net/productionwindowsarchives/MS-SSTP/[MS-SSTP].pdf).
- [13] Y. Nir e A. Langley. *ChaCha20 and Poly1305 for IETF Protocols*. RFC 7539. <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7539.txt>. RFC Editor, mag. 2015. URL: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7539.txt>.
- [14] Tomas Novickis, Erik Poll e Kadir Altan. *Protocol state fuzzing of an OpenVPN*. 2016. URL: https://www.ru.nl/publish/pages/769526/tomas_novickis.pd.
- [15] OpenConnect. *OpenConnect*. URL: <http://www.infradead.org/openconnect/>.
- [16] OpenConnect. *OpenConnect Server sample config*. URL: <https://gitlab.com/openconnect/ocserv/blob/master/doc/sample.config>.
- [17] OpenConnect. *OpenConnect VPN Server*. URL: <http://www.infradead.org/openconnect/>.
- [18] OpenVPN. *Are there any known security vulnerabilities with OpenVPN?* URL: <https://openvpn.net/index.php/open-source/faq/75-general/295-are-there-any-known-security-vulnerabilities-with-openvpn.html>.
- [19] OpenVPN. *FAQ General*. URL: <https://openvpn.net/index.php/access-server/section-faq-openvpn-as/general/225-compare-openvpn-community-and-enterprise-editions.html>.
- [20] OpenVPN. *HOWTO-Introduction*. URL: <https://openvpn.net/index.php/open-source/documentation/howto.html>.
- [21] OpenVPN. *OpenVPN Community Software*. URL: <https://openvpn.net/index.php/open-source.html>.
- [22] OpenVPN. *Security Overview*. URL: <https://openvpn.net/index.php/open-source/documentation/security-overview.html>.
- [23] OpenVPN. *Site-to-site routing explained in detail*. URL: <https://docs.openvpn.net/connecting/site-to-site-routing-explained-in-detail/>.
- [24] B. Patel et al. *Securing L2TP using IPsec*. RFC 3193. RFC Editor, nov. 2001.
- [25] Yakov Rekhter et al. *Address Allocation for Private Internets*. BCP 5. <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1918.txt>. RFC Editor, feb. 1996. URL: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1918.txt>.
- [26] E. Rescorla. *The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3*. RFC 8446. RFC Editor, ago. 2018.
- [27] E. Rescorla e N. Modadugu. *Datagram Transport Layer Security Version 1.2*. RFC 6347. <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6347.txt>. RFC Editor, gen. 2012. URL: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6347.txt>.

- [28] J. Salim et al. *Linux Netlink as an IP Services Protocol*. RFC 3549. RFC Editor, lug. 2003.
- [29] V. Singh e S. K. Peddoju. «Container-based microservice architecture for cloud applications». In: *2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*. Mag. 2017, pp. 847–852. DOI: 10.1109/CCAA.2017.8229914.
- [30] Edward Snowden. *Intro to the VPN Exploitation Process*. URL: <https://snowdenarchive.cjfe.org/greenstone/collect/snowden1/index/assoc/HASHf820.dir/doc.pdf>.
- [31] SoftEther. *Build a LAN-to-LAN VPN (Using L2 Bridge)*. URL: [https://www.softether.org/4-docs/1-manual/A._Examples_of_Building_VPN_Networks/10.5_Build_a_LAN-to-LAN_VPN_\(Using_L2_Bridge\)](https://www.softether.org/4-docs/1-manual/A._Examples_of_Building_VPN_Networks/10.5_Build_a_LAN-to-LAN_VPN_(Using_L2_Bridge)).
- [32] SoftEther. *Build a LAN-to-LAN VPN (Using L3 IP Routing)*. URL: [https://www.softether.org/4-docs/1-manual/A._Examples_of_Building_VPN_Networks/10.6_Build_a_LAN-to-LAN_VPN_\(Using_L3_IP_Routing\)](https://www.softether.org/4-docs/1-manual/A._Examples_of_Building_VPN_Networks/10.6_Build_a_LAN-to-LAN_VPN_(Using_L3_IP_Routing)).
- [33] SoftEther. *Dynamic DNS and NAT Traversal*. URL: https://www.softether.org/4-docs/2-howto/6.VPN_Server_Behind_NAT_or_Firewall/1.Dynamic_DNS_and_NAT_Traversal.
- [34] SoftEther. *Exploit SecureNAT for Remote Access into Firewall without Any Permission*. URL: https://www.softether.org/4-docs/1-manual/A._Examples_of_Building_VPN_Networks/10.B_Exploit_SecureNAT_for_Remote_Access_into_Firewall_without_Any_Permission.
- [35] SoftEther. *SoftEther VPN Project*.
- [36] SoftEther. *VPN over ICMP, and VPN over DNS (Awesome!)* URL: [https://www.softether.org/1-features/1._Ultimate_Powerful_VPN_Connectivity#1.6._VPN_over_ICMP.2C_and_VPN_over_DNS_\(Awesome!\)](https://www.softether.org/1-features/1._Ultimate_Powerful_VPN_Connectivity#1.6._VPN_over_ICMP.2C_and_VPN_over_DNS_(Awesome!)).
- [37] strongSwan. *The OpenSource IPsec-based VPN Solution*. URL: <https://strongswan.org/>.
- [38] strongSwan. *Usable Examples configurations*. URL: <https://wiki.strongswan.org/projects/strongswan/wiki/UsableExamples>.
- [39] J. Thönes. «Microservices». In: *IEEE Software* 32.1 (gen. 2015), pp. 116–116. ISSN: 0740-7459. DOI: 10.1109/MS.2015.11.
- [40] Ubuntu Help. *SSH_VPN*. 2014. URL: https://help.ubuntu.com/community/SSH_VPN.
- [41] Nord VPN. *Which protocol should I choose?* URL: <https://support.nordvpn.com/#/Getting-Started/1047408592/Which-protocol-should-I-choose.htm>.

- [42] G. Vranken. *The OpenVPN post-audit bug bonanza*. 2017. URL: <https://guidovranken.com/2017/06/21/the-openvpn-post-audit-bug-bonanza/>.
- [43] nftables wiki. *Configuring chains*. 2017. URL: https://wiki.nftables.org/wiki-nftables/index.php/Configuring_chains.
- [44] nftables wiki. *Dictionaries*. 2016. URL: <https://wiki.nftables.org/wiki-nftables/index.php/Dictionaries>.
- [45] nftables wiki. *Maps*. 2016. URL: <https://wiki.nftables.org/wiki-nftables/index.php/Maps>.
- [46] nftables wiki. *Netfilter hooks*. 2017. URL: https://wiki.nftables.org/wiki-nftables/index.php/Netfilter_hooks.
- [47] nftables wiki. *Nftables families*. 2017. URL: https://wiki.nftables.org/wiki-nftables/index.php/Nftables_families.
- [48] nftables wiki. *Scripting*. 2018. URL: <https://wiki.nftables.org/wiki-nftables/index.php/Scripting>.
- [49] nftables wiki. *Sets*. 2017. URL: <https://wiki.nftables.org/wiki-nftables/index.php/Sets>.
- [50] nftables wiki. *Why nftables?* 2017. URL: https://wiki.nftables.org/wiki-nftables/index.php/Why_nftables%3F.
- [51] WireGuard. *Quick Start*. 2018. URL: <https://www.wireguard.com/quickstart/>.