



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BERGAMO**

Dipartimento di
Ingegneria

Corso di laurea in
Ingegneria Informatica

Classe n. L-8

Vulnerabilità di Fuga da Docker

Candidato:

Giorgio Chirico

Relatore:

Chiar.mo Stefano Paraboschi

Matricola n.

1068142

Anno Accademico
2022/2023

ABSTRACT

I containers sono degli ambienti di lavoro e di runtime virtualizzati, divenuti popolari per la loro leggerezza, flessibilità, portabilità e la capacità di fornire sistemi isolati senza bisogno di hypervisor.

Essendo che si basano sul sistema operativo ospitante, tra host e container non vi è una completa separazione degli spazi d'indirizzi: senza le dovute misure di sicurezza, dunque, può aprirsi la possibilità di una escalation dei privilegi sulla macchina ospitante a partire dal container.

Docker è un framework popolare per la gestione dei container: semplifica ai developer l'interazione coi container e la "containerizzazione" delle applicazioni per mezzo di comandi di alto livello.

In questa tesi viene proposta un'illustrazione variegata di contesti di vulnerabilità atti a dimostrare, per mezzo di codici realizzati nei linguaggi Python3, C, Shell, Bash, Dockerfile, la possibilità di fuga da container, con lo scopo di aprire una riflessione su determinate vulnerabilità del framework Docker e le forme di mitigazione adoperabili.

INDICE DEI CONTENUTI

	pagina
1 INTRODUZIONE	2
1.1 Container.....	2
1.1.1 Container Management Framework	2
1.2 Isolamento processi in Linux	3
1.2.1 Spazi d'indirizzi.....	3
1.2.2 Gruppi di controllo	3
1.3 Sicurezza Linux	5
1.3.1 Moduli Capability.....	5
1.3.2 Secure Computing mode	5
1.3.3 Linux Security Modules	5
1.4 Docker.....	7
1.4.1 Architettura framework	7
1.4.2 Isolamento del container Docker.....	8
1.4.3 Immagine Docker	9
1.4.4 Filesystem del container Docker	9
1.4.5 Networking in Docker	10
1.4.6 Sicurezza del container Docker	11
1.5 Container Escape Vulnerability	12
2 IMPLEMENTAZIONE	13
2.1 Accesso non privilegiato a docker	13
2.2 Misconfiguration della capability CAP_SYS_PTRACE.....	15
2.2.1 Exploit ptrace_infect.py.....	15
2.3 Abuso del User Mode Helper	16
2.3.1 Abuso del cgroup-v1 release_agent.....	16
2.3.2 Abuso del core_pattern.....	17
2.4 Abuso dei symlink di processo	19
2.4.1 Abuso del symlink root.....	19
2.4.2 Abuso del processo "runC init".....	19
2.5 Abuso del Docker socket	21
2.5.1 Docker UNIX socket montato	21

2.5.2	Docker TCP socket esposto	21
2.5.3	Exploit: dockerio.py	21
RIFERIMENTI.....		28

INDICE DELLE FIGURE

	Pagina
Figura 1: P.O.C. usando binary docker.....	14

1 INTRODUZIONE

1.1 Container

Un container [1] è una tecnologia software che permette la veloce creazione, configurazione e attivazione di sistemi operativi o ambienti di sviluppo di applicativi sia desktop che cloud: punto di forza dei container è la loro leggerezza e indipendenza dalla piattaforma su cui vengono creati ed eseguiti: per mezzo di configurazioni pre-impacchettate, dette immagini [2], è possibile la costruzione di questi container, la cui esecuzione può esser configurata a seconda delle esigenze.

I container forniscono, rispetto all'host, un minimo grado di isolamento dei processi attivi al loro interno per mezzo degli "spazi di indirizzi" (anche detti *namespace*): i processi interni al container creato "non hanno idea" di essere parte di un sottospazio dell'host.

L'isolamento offerto dai container non è totale: mentre lo spazio utente viene interamente astratto, lo spazio kernel è lo stesso dell'host. Questa è un'importante differenza rispetto alle macchine virtuali, oltre al fatto che quest'ultime provocano un maggiore overhead in fase d'esecuzione.

1.1.1 Container Management Framework

Esistono diversi framework per la gestione dei container, attraverso riga di comando o gestore applicativo. Generalmente, questi framework si distinguono in base al controllore o all'owner dei componenti del framework.

In base al controllo, si ha un framework *daemon-based* se il controllo delle richieste d'interazione con l'ambiente, i container e le immagini è gestito da un controllore centrale, detto "demone"; in caso contrario, il framework si dice *daemonless*.

Un esempio di framework *daemon-based* è il framework Docker, mentre un esempio di framework *daemonless* è il framework Podman [3].

In base all'owner dei componenti, si può distinguere il framework in *root* o *rootless* a seconda se l'owner sia rispettivamente l'utente con massimi privilegi del sistema operativo ospitante, detto `root`, oppure un utente non privilegiato.

1.2 Isolamento processi in Linux

Linux mette a disposizione diverse feature per l'esecuzione isolata di gruppi di processi, al fine di limitare l'accesso alle risorse di sistema o fornire un'ambiente di runtime virtualizzato.

1.2.1 Spazi d'indirizzi

Gli spazi d'indirizzi, anche detti *namespace*, sono una caratteristica dei kernel Linux: hanno il compito di isolare le risorse di un certo gruppo di processi dalle risorse di altri gruppi di processi [4].

Prendendo come esempio il caso specifico dei containers, i namespace sono responsabili dell'ambiente percepito dai processi interni al container: attraverso la virtualizzazione di un determinato gruppo di risorse host, ciascun namespace contribuisce alla creazione di un nuovo ambiente di lavoro, replicando un sistema operativo dentro al quale i processi del container vivono confinati. In tal modo, i processi interni al container non possono percepire altri processi esterni al container, né accedere a risorse non definite dai namespace.

Ad esempio, il net namespace gestisce le risorse network per un certo gruppo di processi: se un processo venisse originato con un net namespace diverso dall'analogo spazio d'indirizzi sull'host, come può essere dall'interno di un container, questo avrebbe l'impressione di avere uno stack network completamente indipendente dallo stack network "reale" dell'host [5].

Quando un certo namespace è condiviso con l'host, i processi fanno riferimento alle stesse risorse usate sull'host: se, per esempio, il gruppo di processi interni a un container non ha lo user namespace separato dall'host, allora l'utente `root` (UID 0) ed il gruppo `root` (GID 0) presenti nel container sono rispettivamente lo stesso utente e lo stesso gruppo definiti e utilizzati sull'host.

1.2.2 Gruppi di controllo

Questa funzionalità, offerta dal kernel Linux, permette la creazione di gruppi di controllo atti a limitare e gestire un certo gruppo di risorse quali CPU, uso della memoria, quantità di memoria, risorse network e operazioni I/O su dispositivi di blocco, per uno specifico gruppo di processi [6].

I cgroup sono organizzati in maniera gerarchica in elementi detti *unit* [7]:

- *Service unit*: consente il raggruppamento di più processi in un unico elemento di gestione;
- *Scope unit*: permette di raggruppare processi creati esternamente, come containers, sessioni utente, macchine virtuali;
- *Slice unit*: organizzano la gerarchia delle service unit e scope unit. Le slice sono a loro volta organizzate in una gerarchia.

Soffermendosi sulle slice, il sistema organizza in default quattro slice principali:

- La slice radice, *-.slice*;
- La slice per le macchine virtuali e container, *machine.slice*;
- La slice per le sessioni utente, *user.slice*;
- La slice per tutti i service di sistema, *system.slice*.

Un qualsiasi processo può accedere ai propri cgroup seguendo il percorso “/proc/self/cgroup” [8]. DalL’host, è possibile visionare la gerarchia dei gruppi di controllo al percorso “/sys/fs/cgroup”.

Oggi esistono due versioni di cgroup: v1 e v2 [9].

1.3 Sicurezza Linux

In generale, i sistemi UNIX e derivati, come Linux, distinguono due tipi di processo: i processi privilegiati (o “processi root”, UID=0), aventi pieni permessi di accesso, e i processi non privilegiati (con UID≠0).

Oltre a questa classificazione, il kernel Linux integra diversi sistemi di controllo dei permessi.

1.3.1 Moduli Capability

Dalla versione 2.2 di Linux, i processi non privilegiati hanno la possibilità di accedere a determinate risorse privilegiate per mezzo delle capability: singoli privilegi che caratterizzano i processi root [10]. Per esempio, la capability CAP_SYS_TIME permette ad un processo non privilegiato di impostare l’orologio di sistema.

1.3.2 Secure Computing mode

Il Secure Computing mode o Seccomp è uno strumento di sandboxing integrato nel kernel Linux dalla versione 2.6.12 [11].

Quando Seccomp è attivo su un processo, vengono consentiti ai suoi thread un limitato numero di syscall: read, write, exit, sigreturn.

Le versioni più recenti di Seccomp adottano il Berkeley Packet Filter per favorire una maggiore flessibilità nelle restrizioni: è possibile creare delle blacklist o whitelist per esplicitare, rispettivamente, le syscall proibite o le syscall consentite all’interno del processo [12].

A seconda di come viene impostato il filtro di Seccomp-bpf, richiamare una syscall non consentita da un processo sorvegliato può causare un segnale di risposta negativo, un logging dell’evento o la terminazione del processo [13].

1.3.3 Linux Security Modules

Il Linux Security Modules è un framework che integra diversi sistemi di sicurezza basati sul paradigma Mandatory Access Control, cioè sistemi che applicano restrizioni d’accesso alle risorse per mezzo di policy: due esempi sono SELinux e AppArmor [14].

SELinux segue il funzionamento label-based: estende le ACL di ogni file di sistema aggiungendo un tag con la forma ‘*user:role:type:Level*’ [15].

- *User*: l'utente della policy che ha accesso a delle specifiche "Role", con un particolare "Level". Ogni utente Linux è mappato a un utente SELinux corrispondente, tramite una policy SELinux;
- *Role*: ereditabili, danno l'autorizzazione a certi "Type";
- *Type*: riferiti a oggetti del filesystem o tipi di processo (quest'ultimi, nello specifico, sono anche detti domini), servono alle policy SELinux per specificare come un certo "Type" può accedere ad altri "Type";
- *Level*: opzionale, livello di confidenzialità dell'informazione secondo il modello Bell-LaPaula, usato se SELinux è in modalità MLS(Multy-Layer Security) o MCS(Multy-Category Security). Queste modalità sono combinabili.

SELinux ha tre modalità di gestione delle policy: Enforcing, Permissive, Disabled, la cui risposta a un accesso interdetto corrisponde rispettivamente a blocco, stampa d'avvertimento, indifferenza.

Mentre SELinux è solitamente attiva nei sistemi Fedora-based, AppArmor rappresenta l'alternativa operante più comune nei sistemi OpenSUSE e Debian-based.

Le policy di AppArmor sono delle whitelist che definiscono i privilegi con cui il processo può accedere alle risorse di sistema e ad altri processi, garantendo così una forma di protezione verso il processo, oltre al controllo del suo comportamento [16].

AppArmor organizza le policy in profili: ciascun profilo basa il proprio controllo su un determinato dominio, come un applicativo, un utente o l'intero sistema.

Ogni profilo può agire in tre modalità: *enforced*, *complain* o *unconfined*, dove la trasgressione del profilo causa, rispettivamente, il blocco, il logging, o l'esecuzione incondizionata dell'operazione.

I profili usano le *rule* per definire l'accesso a determinate capability, risorse network, files: tali *rule* sono applicate a insiemi di percorsi file per mezzo di espressioni regolari [17].

1.4 Docker

Docker è un framework open-source, sviluppato dalla Docker Inc., per lo sviluppo e l'impiego di container basati su kernel Linux [18]. Offre una gestione di alto livello dei containers, sia da riga di comando che da applicativo desktop.

1.4.1 Architettura framework

Docker è daemon-based e, di base, root: le componenti del framework Docker sono di proprietà dell'utente root (UID=0), mentre appartengono al gruppo "docker" (il suo GID varia da sistema a sistema) o al gruppo root (GID=0).

Docker è sviluppato come un'architettura client-server conforme alle regole REST API: la comunicazione tra clienti e controllore, basata su HTTP, è gestita in maniera stateless seguendo un formato standard specificato nella documentazione della Docker API [19]. Di base, l'architettura Docker è così costituita:

- lato client, la *Docker CLI*: dotato interfaccia a riga di comando per interagire col framework Docker per mezzo di richieste HTTP;
- lato server, *Docker Engine*: una RESTful API che risponde alle richieste della Docker CLI e gestisce il sistema Docker;
- sul cloud, le registry: repositories di immagini a cui il framework, anche automaticamente, fa richiesta per ricevere le immagini mancanti in locale, o su cui è possibile salvare, con un proprio account, le proprie immagini.

Riguardo al Docker Engine, risultano fondamentali le componenti che seguono:

- *dockerd* [20] : anche detto Docker Daemon, resta in ascolto di default su un socket UNIX, in attesa di richieste conformi all'API di Docker. Ha ruolo di controllore centrale per l'intero sistema Docker: gestisce gli oggetti Docker quali immagini, containers, volumi, networks e le task di alto livello quali, ad esempio, login, build, inspect, pull. Può esser posto in ascolto su un socket TCP;
- *containerd* [21] [22]: il Container Daemon, gestisce la container runtime. La maggior parte delle interazioni a basso livello sono gestite da una componente al suo interno chiamata runC;
- *runC* [23]: una runtime indipendente che garantisce la portabilità dei containers conformi agli standard. Tra le sue caratteristiche, spicca il supporto nativo per tutti i componenti di sicurezza Linux come, ad esempio, AppArmor, Seccomp, control

groups, capability. Ha completo supporto dei Linux namespace, inclusi user namespace: è responsabile della creazione dei namespace ed esecuzione dei containers. In particolare, runC è invocata da containerd-shim [24]: processo figlio di containerd e parente diretto del container che verrà creato. Tale processo è responsabile dell'intero ciclo di vita del container e delle logiche di riconnessione. Anche la gestione dei containerd-shim avviene tramite API [25].

Si prenda per esempio l'esecuzione del comando da CLI `docker run`:

1. tramite richiesta API, viene ordinato a dockerd la creazione del container con l'immagine selezionata che, qualora mancante, verrà scaricata dal registry;
2. ricevuta tramite API la richiesta di inizializzazione del container, dockerd riferisce a containerd di preparare l'ambiente d'esecuzione ed avviare il container.

1.4.2 Isolamento del container Docker

Gli spazi d'indirizzi vengono creati in fase di inizializzazione del container dal componente runC. Più nel dettaglio, runC esegue la syscall *unshare* per la creazione dei namespace interni al container [26], poi effettua una fork del processo di init (PID 1) all'interno del container e, infine, termina la propria esecuzione.

Essendo runC componente di containerd, è possibile ottenere la traccia delle syscalls necessarie alla creazione dei namespace applicando il comando `strace` su containerd. In particolar modo, si può notare l'impostazione delle flag di *unshare* per la creazione di nuovi spazi d'indirizzi del container come, ad esempio, `CLONE_PID` [27], responsabile della creazione del nuovo pid namespace, ovvero lo spazio d'indirizzi che permette una numerazione PID indipendente dalla numerazione PID "reale" sull'host.

Un modo più diretto per verificare la separazione degli spazi d'indirizzi è realizzabile confrontando la bash di un terminale sull'host con un processo in loop generato da un container. Il contenuto della sottocartella di processo `ns` presenta dei symlinks che fan riferimento ai namespace del processo, identificabili univocamente grazie all'inode mostrato nelle parentesi quadre [28].

Prima di tutto, si estraggono le informazioni dei namespace del processo terminale applicando il comando `ls -l /proc/$$/ns`. Dopodichè, si crea una task "lunga" in un container e si ricerca la task su host tramite il comando `ps`, per poi estrarre il PID "reale" della task e accedere alle informazioni della sua sottocartella `ns` come fatto per il terminale.

In questo modo, è possibile distinguere quali namespace di un container Docker risultano indipendenti dal sistema operativo ospitante e quali non: in condizioni di default, risultano isolati i namespace ipc, mnt, net, pid, uts, mentre il namespace cgroup risulta condiviso o meno se è attivo, rispettivamente, cgroup v1 o cgroup v2 [29].

Il cgroup attivo determina, inoltre, il cgroup driver di Docker, che in cgroup v1 è il cgroupfs /docker, mentre in cgroup v2 è la slice di sistema system.slice.

Di default i cgroup driver sono creati sotto il cgroup root (il cgroup driver “/”).

Tramite comando, è possibile configurare i namespace del container e i cgroup in fase d’inizializzazione del container: ad esempio, aggiungendo al comando `docker run` opzioni come `--pid o --memory` [30].

1.4.3 Immagine Docker

Ogni container Docker è creato sulla base di un oggetto Docker detto *immagine*: una configurazione read-only contenente le dipendenze necessarie alla creazione dell’ambiente di runtime del container.

Le immagini sono strutturate in layers che, creati in successione, aggiungono file, cartelle, librerie, informazioni di configurazione all’ambiente.

Docker dà la possibilità agli sviluppatori di creare nuove immagini personalizzate a partire da un’immagine pre-esistente grazie al Dockerfile: un file di configurazione per la progettazione di immagini, facente uso di istruzioni con sintassi specifica come `FROM` per “importare” un’immagine base, `RUN` per eseguire comandi, `USER` per selezionare l’utente attivo nell’esecuzione delle istruzioni e, successivamente, nel container [31].

Per completare la realizzazione dell’immagine, la Docker CLI mette a disposizione il comando `docker build` [32].

1.4.4 Filesystem del container Docker

Il filesystem montato nel container Docker è, di default, un *union mount filesystem* basato su una feature chiamata OverlayFS [33], presente nel kernel Linux dalla versione 4.0.

Il filesystem di un container Docker è formato da tre livelli:

- *lowerdir*: livello read-only del filesystem;
- *upperdir*: livello scrivibile del filesystem;
- *merged*: risultato dalla procedura di *union mount* dei precedenti livelli, contiene i riferimenti per ogni elemento presente in *upperdir* ed ogni elemento presente in

lowerdir ma assente in *upperdir*. Questa costituisce il punto di mount del filesystem presente nel container.

La creazione del filesystem del container segue un meccanismo Copy-On-Write: viene creato un layer scrivibile dedicato al container, dove il livello *upperdir* è rappresentato dalla cartella *diff* e il livello *merged* da una cartella omonima. La *lowerdir* è costituita dai layer dell'immagine adottata, dei quali il container memorizza i riferimenti simbolici [34].

Dalla versione 23.0.0 del Docker Engine, il driver di archiviazione predefinito è *overlay2*: si è sostituito a *overlay* introducendo vantaggi quali il supporto nativo di *lowerdir* composte fino a 128 layers.

Se si provasse a creare un file o modificare un file read-only, il file risultante verrebbe creato nella cartella *merged* e nella cartella *upperdir*, mentre la cancellazione di un elemento read-only ne determina l'eliminazione del riferimento dalla cartella *merged*, mentre verrebbe creato un file corrispondente a un “segnaposto” nella cartella *upperdir* [35].

Mentre il filesystem del container è generalmente volatile, Docker mette a disposizione dei meccanismi di memorizzazione persistente montabili nel container, detti volumi: sono un elemento Docker simile alle bind mounts ma con diversi vantaggi, come la facilità di backup, migrazione, condivisione e interoperabilità [36] .

Un volume può esser montato durante l'esecuzione del comando `docker run` inserendo l'opzione `-v` a cui seguono, in successione e separati da carattere “:”, due elementi obbligatori e uno opzionale: rispettivamente, il percorso su host indicante il volume da montare, il percorso nel filesystem del container indicante il punto di mount e l'opzione `ro` qualora si volesse rendere non scrivibile il volume montato.

1.4.5 Networking in Docker

Docker inserisce i container in una rete dedicata.

Le network stesse sono degli oggetti Docker: la Docker CLI mette a disposizione il comando `docker network` per la creazione, rimozione, gestione di queste [37].

L'installazione di Docker Engine offre tre network predefinite:

- Network *none* [38] : i container all'interno di questa rete non hanno un IP assegnato, ma solo l'indirizzo di loopback. Pertanto, non hanno alcuna possibilità di operare in rete.

- Network *host* [39] : l'intero stack network dell'host sarà condiviso con i container che partecipano a questa rete;
- Network *bridge* [40] : di default, i container sono inseriti qui. l'indirizzo IP di rete è, di norma, 172.17.0.0, con submask 255.255.0.0. l'indirizzo 172.17.0.1 viene assegnato all'interfaccia host docker0, che assume il ruolo di bridge della network .

Ogni container all'interno della network ha un'interfaccia “veth” collegata al bridge della propria network.

Per i container all'interno della network *bridge* è possibile comunicare con l'host in maniera bidirezionale, comunicare con altri containers e raggiungere la rete esterna alla macchina, come Internet. Rimangono comunque irraggiungibili dall'esterno, se non per mezzo di una porta associata con l'host.

Le network in Docker hanno un server DNS incorporato che permette ai containers di risolvere i nomi degli altri containers per raggiungerli, anziché usare il loro IP. Risulta inoltre possibile creare dei bridge tra le network per permettere a queste di comunicare tra loro, inserire firewalls e server proxy [41] .

La Docker CLI permette di selezionare la rete in cui inizializzare il container durante l'esecuzione del comando `docker run` tramite l'opzione `--net` [42].

1.4.6 Sicurezza del container Docker

Docker possiede dei profili di default per Seccomp [43] e AppArmor [44], applicati ai container in esecuzione quando non viene specificata un'altra policy: ad esempio, la Docker CLI offre l'opzione `--security-opt` per applicare una policy personalizzata.

Normalmente, i container Docker vengono eseguiti come processi non privilegiati, con un set limitato di capability, ma è possibile rimuovere o aggiungere tutte le capability messe a disposizione dal kernel. Per esempio, la Docker CLI permette l'inizializzazione di containers privilegiati, con tutte le capability, usando l'opzione `--privileged`, mentre è possibile gestire le capability con le opzioni `--cap-add` e `--cap-drop`.

Esiste una policy SELinux ad-hoc per Docker, il cui supporto può essere attivato dal demone dockerd tramite la flag `--selinux-enabled`.

1.5 Container Escape Vulnerability

Questa vulnerabilità descrive generalmente la capacità di un utente malevolo di poter effettuare azioni privilegiate sull'host a partire da un container.

Per Docker, possiamo generalmente individuare tre scenari d'attacco:

- Attacco esterno, allo scopo di penetrare i servizi esposti in rete;
- Accesso a un container compromesso, dov'è possibile sfruttare le proprietà d'ambiente per raggiungere l'host;
- Insider malevolo: un utente di sistema non privilegiato che tenta di accedere a privilegi non previsti dal suo profilo.

Un container Docker presenta vulnerabilità ad attacchi esterni quando è possibile, dalla rete esterna, individuare le vulnerabilità per mezzo di testing sui servizi esposti: a seguito di questa prima fase, detta *enumerazione* [45], si può aprire la possibilità di un accesso imprevisto al container, detto *initial foothold* [46].

Lo studio dell'ambiente containerizzato può far emergere determinate caratteristiche che l'attaccante può sfruttare per ottenere l'accesso a risorse di privilegio superiore, cioè una *elevazione dei privilegi* (o *vertical privilege escalation*, [47]).

Relativamente alla macchina ospitante, un'elevazione dei privilegi massima risulta nell'accesso completo ad ogni risorsa root di sistema.

L'elevazione dei privilegi può costituire obiettivo anche per gli utenti non privilegiati di sistema, purchè Docker sia accessibile senza necessità di privilegi.

Non tutti gli attacchi hanno le stesse caratteristiche: mentre l'abuso di risorse può esser una strategia di lungo termine e difficile da individuare, l'interruzione del servizio Docker è rilevabile in fretta, con alto impatto a breve termine.

2 IMPLEMENTAZIONE

2.1 Accesso non privilegiato a docker

Far parte del gruppo ‘docker’ permette l’utilizzo di Docker senza necessariamente far parte del file ‘Sudoers’, il file dei super users.

Si ipotizzi che un insider malevolo voglia acquisire il ruolo di utente `root` sull’host; perché ciò sia possibile, l’attaccante deve:

- Far parte del gruppo “docker”;
- Avere accesso alla binary “docker” della Docker CLI;
- Avere accesso a Docker root-based.

L’attacco richiede due soli passi. Nel primo passo, si crea un container da Docker CLI, col comando `docker run` seguito dai parametri:

- Opzione “-it”: viene aperto lo standard input sul container e allocata sessione terminale;
- Opzione “-v /:/host”: monta la cartella radice “/” dell’host, sottoforma di volume, al percorso “/host” del filesystem interno al container;
- Opzione “--privileged” : Seccomp e AppArmor disabilitati, tutti i moduli capability vengono abilitati per il processo container;
- Opzione “--net=host”: il container viene creato con accesso al network stack dell’host;
- Opzione “--pid=host”: il pid namespace è lo stesso dell’host. Questo significa che, dal container, è possibile vedere tutti i processi presenti nel namespace dell’host, ad esempio tramite comando `ps a`.

Il secondo passo richiede l’attivazione della syscall *chroot*, utilizzabile grazie alla capability `CAP_SYS_CHROOT`: questa syscall cambia il riferimento base per la risoluzione dei percorsi file all’interno del container. Specificando come argomento di chiamata il volume montato, verrà preso come riferimento base la cartella radice di sistema.

Il risultato finale è una shell interattiva sul filesystem dell’host, con propagazione permanente delle modifiche e privilegi `root`.

```

dev@host:~$ docker images
REPOSITORY          TAG         IMAGE ID      CREATED        SIZE
alpine               latest      5e2b554c1c45  8 weeks ago   7.33MB

dev@host:~$ docker run -it -v /:/host --rm --privileged --pid=host
--net=host alpine sh

/ # chroot /host

root@host:/# touch /rootfile
root@host:/# exit

/ # exit

dev@host:~$ cd /
dev@host:/$ ls -all
totale 80

[...]

-rw-r--r--    1 root root      0  8 lug 11.05 rootfile

[...]

dev@host:/$ rm rootfile
rm: rimuovere il file regolare vuoto protetto dalla scrittura
'rootfile'? s
rm: impossibile rimuovere 'rootfile': Permesso negato

dev@host:/$

```

Figura 1: P.O.C. usando binary docker

2.2 Misconfiguration di CAP_SYS_PTRACE

Assegnare troppi privilegi root ad un certo container Docker può portare alla configurazione di un container compromesso.

La seguente dimostrazione vuole illustrare uno scenario dove un container ha abilitato CAP_SYS_PTRACE, capability che permette il tracciamento e debugging dei processi in esecuzione entro i namespace del container, per mezzo della syscall *ptrace*.

Versionsi più recenti del kernel Linux hanno integrato una forma di protezione dall'abuso di *ptrace*, predefinendo dei limiti al suo campo d'azione: si può considerare l'esempio di Ubuntu che, a partire dalla versione 10.10, consente l'uso di *ptrace* solo verso i processi figli [48].

Si prenda quindi come riferimento un sistema operativo host Ubuntu superiore alla versione 10.10: dall'interno di un container, per tracciare i processi figli sarebbe necessario consentire la syscall *ptrace*, la cui esecuzione è bloccata da Seccomp e AppArmor.

Per semplicità, si decida quindi di non selezionare alcun profilo Seccomp né AppArmor, impostando entrambi i profili in modalità *unconfined*, così da togliere le restrizioni su *ptrace*.

Per effettuare un debugging, *ptrace* ha bisogno di agganciarsi ad un processo di cui è specificato il PID: se il pid namespace fosse condiviso con l'host, risulterebbe possibile dall'interno di un container la visualizzazione di tutti i processi del namespace host, ma sarebbe possibile l'aggancio dei soli processi aventi stesso UID del processo tracciante.

Per ottenere il ruolo di root sulla macchina, quindi, occorre che l'utente attivo all'interno del container sia `root`, con UID 0.

Intercettando un processo attivo sull'host, come potrebbe essere un processo server, è possibile iniettare del codice malevolo con istruzioni compilate in linguaggio macchina, così da dirottare l'esecuzione regolare delle istruzioni ed imporre la creazione di un processo che resti in attesa di una connessione remota su una determinata porta host.

Noto l'indirizzo dell'interfaccia host, si può accedere al sistema operativo ospitante in qualità di utente `root`.

2.2.1 Exploit *ptrace_infect.py*

2.3 Abuso del User Mode Helper

Il kernel Linux mette a disposizione un'interfaccia, detta User Mode Linux, che funge da kernel per lo spazio utente, introducendo così uno strato di separazione dall'effettivo kernel Linux destinato alle interazioni di basso livello e sensibili [49].

A supporto delle feature kernel del User Mode Linux, viene messo a disposizione lo User Mode Helper (abbreviato, UMH), un programma che permette al kernel l'esecuzione di chiamate di sistema nello spazio utente. Queste chiamate di sistema sono fornite da processi che fan uso delle funzioni del UMH (quali *call_usermodehelper*, *call_usermodehelper_exec*) [50].

2.3.1 Abuso del cgroup-v1 *release_agent*

La feature cgroup-v1 ha un'opzione che fa uso del UMH: quando abilitata, la terminazione di tutti i processi attivi nel cgroup richiede al UMH di eseguire la routine presente in *release_agent* [51] [52].

L'esecuzione di questo attacco richiede:

- Possedere privilegi `root` per poter accedere ai root cgroup;
- Possedere un container con sufficienti privilegi per montare un cgroup, facendo uso della syscall *mount*: occorre quindi abilitare la capability `CAP_SYS_ADMIN`, mentre vanno disabilitati `Seccomp` e `AppArmor`.

All'interno del container, viene montato il root cgroup di sistema, contenente il *release_agent*. Dentro alla cartella del cgroup radice, viene creata una cartella che automaticamente monter  un nuovo cgroup figlio.

Dentro al cgroup figlio vi   *notify_on_release*: scrivendo 1 dentro a tale file, verr  abilitato il supporto del *release_agent*.

Si prepara un file eseguibile contenente un programma malevolo: per la dimostrazione, si   scelto come payload una reverse shell che connette a un host remoto in attesa per una sessione `bash`.

Tale file eseguibile   destinato al *release_agent*, che verr  eseguito dal kernel; tuttavia, il kernel prende come riferimento base per la risoluzione dei percorsi la cartella radice dell'host.

Se il container usa overlayFS, allora il file malevolo creato si troverà nel livello upperdir: è possibile individuare il path assoluto verso la cartella di sistema montata come upperdir grazie al file di configurazione `/etc/mtab` [53].

Estratto il percorso upperdir per raggiungere il file eseguibile, si sovrascrive il contenuto del `release_agent` con la stringa risultante.

Per azionare il meccanismo, occorre inserire un processo veloce nel `cgroup.procs` del figlio: una volta finito il processo, il kernel attiverà il payload e conatterà l'host remoto alla macchina ospitante.

2.3.2 Abuso del `core_pattern`

Il root filesystem del container monta lo pseudo-filesystem `/proc`: un'interfaccia verso le strutture dati del kernel. Mentre la maggior parte del `/proc` filesystem è montato come read-only, alcuni dei file sono modificabili: nella sottodirectory `/proc/sys/kernel`, sono presenti dei file che permettono l'impostazione di diversi parametri del kernel, tra cui `core_pattern` [54].

Il `core_pattern` viene utilizzato dal kernel nella procedura di creazione del core dump, un file contenente lo stato della memoria al momento della terminazione imprevista di un certo programma [55].

Nel `core_pattern`, è possibile specificare la destinazione del core dump o, qualora la stringa contenuta nel `core_pattern` iniziasse con il carattere `"|"`, di specificare un programma da eseguire in user space.

Alla terminazione imprevista di un processo, viene richiesto al UMH di leggere il `core_pattern` per completare la procedura di creazione del core dump [56].

All'interno del container, normalmente, il filesystem `/proc` è completamente read-only, ma esistono configurazioni in cui è consentita la scrittura del `core_pattern` da parte di `root`: ad esempio, il caso in cui il filesystem `/proc` è montabile, con la capability `CAP_SYS_ADMIN` abilitata e le strutture del LSM framework disabilitate, come il caso in cui il container è completamente privilegiato.

Quando il `core_pattern` è scrivibile da `root`, si procede con la preparazione di un file malevolo eseguibile, si estrae il suo percorso nel livello upperdir, estraendo i dati necessari da `/etc/mtab` e lo si inserisce nel `core_pattern`, precedendolo col carattere `"|"`.

Si crea un file la cui esecuzione deve terminare in maniera anomala: una volta eseguito, il messaggio “segmentation fault (core dumped)” indicherà sia completamento della procedura di core dump che, dunque, dell’esecuzione del file malevolo.

2.4 Abuso dei symlink di processo

Nel pseudo-filesystem `/proc`, le risorse dei rispettivi processi sono raggiungibili presso le sottocartelle intitolate coi relativi PID.

Tra queste risorse, ci sono dei riferimenti simbolici a file o cartelle, come il symlink `root`, che specifica la radice del processo, o il symlink `exe`, contenente il percorso file al comando eseguito per inizializzare il processo.

Altri symlink sono presenti direttamente nella radice di `/proc`, come ad esempio `/proc/self`: un riferimento simbolico alla cartella col PID del processo che vi sta accedendo. Un processo che accede ai contenuti di `/proc/self`, dunque, sta accedendo ai contenuti della sottocartella che ha il suo stesso PID.

Quando un processo tenta l'accesso ad un riferimento simbolico nella struttura `/proc`, il kernel parte dalla cartella radice associata al processo per risolvere il percorso indicato.

2.4.1 Abuso del symlink root

Prendendo come esempio il `release_agent` dei `cgroup-v1`, è possibile procedere con un approccio brute-force per indovinare, sull'host, il PID di un processo interno al container e accedere al suo symlink `root`, che si risolverà con la cartella radice del sistema containerizzato.

Sapendo che `/proc` ha la medesima struttura in ogni filesystem presente sul sistema, si può inserire nel `release_agent` il percorso `"/proc/[PID]/root/payload"` dove `[PID]` è una variabile che partirà da 1 (o più, dato che il PID 1 certamente non può essere un processo interno al container) per arrivare al massimo PID di sistema, mentre `"payload"` è il file malevolo creato nel container.

2.4.2 Abuso del processo "runC init"

In Docker, i comandi `docker run` e `docker exec` consentono l'esecuzione di un processo all'interno di un container: tali processi sono responsabilità di `runC`, che prima crea il processo figlio `runC init`, assegna a questo le dovute restrizioni (come i namespace), e lo avvia nel container. Infine, `runC init` chiama la syscall `execve` per eseguire la binary richiesta: ad esempio, `/bin/bash` o `/bin/sh` per una sessione terminale nel container [57].

Traendo vantaggio dalle funzionalità del symlink */proc/self*, è possibile spingere il processo `runC init` ad eseguire il proprio symlink *exe*, indicando la binary */usr/sbin/runC* presente sul sistema, così da inizializzare un'istanza di sé stesso.

Ciò è possibile manipolando una binary che potrebbe esser richiamata da un processo in entrata.

L'esecuzione di */proc/self/exe* porta due conseguenze significative:

- La registrazione di */proc/self/exe* tra i processi attivi, rendendo estraibile il PID del chiamante `runC init`, ad esempio tramite snapshot fornito da comando `ps`;
- L'apertura del descrittore file di `runC`, il cui riferimento verrà quindi registrato nella sottocartella *fd* del processo `runC init`, nella struttura */proc*.

L'attaccante dovrà quindi estrarre il PID del `runC init`, accedere alle sue risorse nel pseudo-filesystem */proc* e aprire il riferimento al descrittore file di `runC` in scrittura, così da sovrascrivere la binary `runC` con un nuovo contenuto eseguibile quale, ad esempio, una reverse shell: nelle versioni di Docker Engine inferiori alla 18.09.2, ciò è possibile [58].

La binary `runC` è di proprietà di `root`, quindi è necessario possedere UID 0 nel container per poter effettuare l'operazione.

Il processo `runC init` non si risolverà in una binary consentita, quindi terminerà in maniera imprevista. Nell'intervallo di tempo che va dall'esecuzione del symlink *exe* da parte di `runC init` fino alla sua eliminazione, l'attaccante ha l'opportunità di sfruttare una race condition cosicchè, alla prossima esecuzione di un comando Docker facente uso della componente `runC`, sarà possibile l'esecuzione privilegiata di codice arbitrario sulla macchina ospitante.

2.5 Abuso del Docker socket

Il socket `docker.sock` è responsabile della gestione della comunicazione con `dockerd` tramite il servizio RESTful di Docker API. I comandi impartiti, ad esempio, da Docker CLI arrivano a questo componente per mezzo di messaggi con protocollo HTTP.

2.5.1 Docker UNIX socket montato

L'attacco descritto a sezione 2.1 può esser realizzato anche nello scenario di un container compromesso, a patto che questo sia stato creato montando come volume `docker.sock`: tale mount è responsabile della comunicazione con `dockerd` tramite la Docker API. Occorre, inoltre, che l'utente del container sia `root` o abbia accesso alla `binary docker`.

Uno scenario di container compromesso con le condizioni di cui sopra può esistere con la configurazione Docker-in-Docker, usata in fase di Continuous Integration per progetti che richiedono il testing di immagini Docker [59].

Esistono, tuttavia, altri scenari dove è necessaria montare la UNIX socket: un esempio sono alcuni applicativi per la gestione centralizzata dell'ambiente Docker, come Traefik [60].

Per precauzione, è uso montare `docker.sock` in `read-only` così da impedire la propagazione delle modifiche sul componente presente in host.

2.5.2 Docker TCP socket esposto

Docker offre l'opzione di comunicare con `dockerd` dall'esterno, esponendo il Docker socket tramite l'associazione con una porta TCP.

Di default, assegnare una porta TCP a `docker.sock` rende la comunicazione con la porta associata di tipo HTTP, non protetta.

L'esposizione del servizio di Docker API aumenta la superficie d'attacco con lo scenario di attacco esterno.

2.5.3 Exploit: `dockerio.py`

Questo script semplifica la comunicazione con la Docker API tramite riga di comando a scopo di testing. In particolare, è possibile utilizzare tale script in un container compromesso per completare una fuga dall'ambiente Docker per completare un host takeover.

Lo script permette di effettuare comandi simili alla Docker CLI:

- Comando `run`: analogo a `docker run`;
- Comando `exec`: esegue un determinato processo in un container. In particolare, è possibile approfondire la richiesta con:
 - o Opzione `--revsh`: il container apre una reverse shell verso una socket di destinazione;
 - o Opzione `--it-cmd`: rende possibile aprire una sessione con terminale interattivo nel container, simile a `-it` ma senza `attach`;
- Comando `ps`: mostra tutti i container e informazioni relative. In particolare, è possibile approfondire la richiesta con:
 - o Opzione `rm [id_container]`: ferma e rimuove il container;
 - o Opzione `[id_container]`: mostra le informazioni del solo container specificato;
- Comando `image`: comandi per la gestione di una singola immagine. In particolare, la richiesta è da approfondire con:
 - o Opzione `load [nome_cont] [sorgente_http]`: permette di caricare da indirizzo remoto `sorgente_http` un'immagine derivata da un container in formato compresso `'tar'` e di assegnargli un nome `nome_cont`;
 - o Opzione `rm [id_immagine]`: rimuove una immagine;
 - o Opzione `[id_immagine]`: mostra informazioni singola immagine
- Comando `images`: mostra tutte le immagini;
- Comando `info`: fornisce informazioni relative al Docker Engine e all'host;
- Comando `event`: fornisce una cronologia degli eventi.

Ognuno di questi comandi è l'astrazione di una o più richieste alla restFUL API.

Ogni richiesta è composta quindi da un percorso HTTP obbligatorio, seguito eventualmente da una `searchQuery` o da un JSON che specificasse i parametri della richiesta. Le richieste possono quindi essere GET per l'estrazione dati, DELETE per l'eliminazione degli elementi e POST per tutte le altre.

Questo script segue gli standard descritti nella Docker API v1.43 Documentation.

Lo script consente di interagire con uno UNIX socket o con un TCP socket, per mezzo di un oggetto `'session'`, gestore di alto livello per una sessione HTTP.

Per interagire con un UNIX socket, questo va montato nella session tramite un adattatore HTTP: l'oggetto `UnixAdapter` svolge questo compito. L'oggetto `UnixAdapter` incapsula ricorsivamente altre due classi, `UnixConnectionPool` e `UnixConnection`, al fine di specificare `'/run/docker.sock'` come UNIX socket a cui 'parlare' per ottenere una comunicazione con Docker API e, di conseguenza, con `dockerd`.

- `UnixConnection` eredita da `urllib3.HTTPConnection`, la quale consente la gestione di una singola sessione HTTP;
- `UnixConnectionPool` eredita da `urllib3.HTTPConnectionPool`, la quale consente la gestione di una pool di connessioni HTTP persistenti;
- `UnixAdapter` eredita da `requests.adapters.HTTPAdapter` ed è responsabile per l'implementazione di un'interfaccia per il livello Transport [61].

2.6 Abuso delle vulnerabilità kernel

Il Docker Engine si appoggia sul sistema operativo ospitante, condividendone lo spazio kernel. Per tale ragione, i container Docker non sono immuni a vulnerabilità intrinseche del kernel installato sul sistema.

2.6.1 Abuso dei user namespace non privilegiati

Con l'aiuto della tecnologia offerta dai namespaces, determinate versioni del kernel rendono possibile una privilege elevation e conseguente fuga dal container per mezzo dei `cgroup-v1`, senza necessità di capability [62].

Diversi sistemi Linux, come Debian e Ubuntu, hanno abilitato di default il supporto alla creazione di nuovi user namespace da parte di utenti non privilegiati.

Questo permette agli utenti di un container, senza LSM abilitati, la creazione di un nuovo spazio d'indirizzi tramite syscall `clone` o `unshare`: l'utente del nuovo user namespace gode di pieni privilegi per le operazioni interne al nuovo namespace [63], con il completo set di moduli capability a disposizione, UID 0 e GID 0.

La creazione di un nuovo namespace segue una dipendenza gerarchica: la virtualizzazione disposta dal nuovo namespace è relativa al namespace da cui proviene.

Questo vale a dire che: se l'utente non aveva accesso privilegiato alle risorse nel namespace padre, l'utente figlio continuerà a non avere accesso privilegiato alle risorse relative al namespace padre e antenati, mentre godrà di pieni privilegi nelle interazioni con le risorse del proprio namespace.

Per esempio, l'utente `root` del nuovo namespace può usare `mount` per montare un `cgroup-v1`, avendo abilitato il modulo `CAP_SYS_ADMIN` nel suo namespace, ma potrebbe non disporre delle condizioni necessarie per avere accesso al `release_agent`: per accedervi, è necessario che l'utente del namespace del container sia `root` e che, a sua volta, l'utente del container sia lo stesso `root` presente sull'host.

Nei container Docker, lo user namespace è condiviso con l'host, quindi un'elevazione dei privilegi con le condizioni qui sopra descritte risulta possibile solo qualora risulti possibile accedere a `release_agent`.

Il `cgroup` namespace può introdurre una forma di confinamento dei processi containerizzati, impedendo la montatura dei `cgroup` antenati [64], compresi i `cgroup`

radice (al percorso host `/proc/sys/cgroups/[risorsa_cgroup]/`), dove si trova il `release_agent`.

Tale limitazione non è presente quando si crea un container avente `CAP_SYS_ADMIN` abilitata, dove la syscall `mount` permette di montare proprio i cgroup radice, mentre è attiva in uno spazio d'indirizzi figlio di un container che non dispone di privilegi aggiuntivi: la soluzione è la creazione di un nuovo cgroup namespace per il nuovo spazio d'indirizzi che si sta andando a creare, insieme ad un nuovo mount namespace così da rimappare i device da montare al nuovo spazio.

Analizzando i cgroup conferiti al processo bash interno al container, risulta che tutti i cgroup sono cgroup radice: in realtà, tale radice è un percorso relativo ai cgroup-v1 in uso dal namespace padre.

In diversi sistemi, come ad esempio Ubuntu, esiste almeno un cgroup-v1 radice nell'asset di configurazione del container, dove `release_agent` risulta raggiungibile.

Eseguendo l'unshare del namespace con le opzioni `-U` (nuovo user namespace), `-r` (traccia il precedente utente come UID 0, GID 0 nel nuovo namespace), `-m` (nuovo mount namespace), `-C` (nuovo cgroup namespace), si ottiene un nuovo spazio d'indirizzi dove è possibile, una volta trovato il cgroup-v1 radice associato al container, una fuga tramite scrittura del `release_agent` e supporto del UHM.

Tale fuga è frutto di una vulnerabilità a livello kernel, che in diverse versioni è già stata sistemata con un aggiornamento patch: prima di poter scrivere sul `release_agent`, diversi kernel ora verificano, prima di tutto, la presenza del `CAP_SYS_ADMIN` nel namespace iniziale del container.

2.6.2 Dirty Pipe

Una vulnerabilità importante nel kernel Linux rende possibile, in alcune versioni del kernel superiori o corrispondenti alla 5.8, una privilege elevation sfruttando la tecnologia delle pipe per sovrascrivere il contenuto di un file read-only [65]: può trattarsi di un file di configurazione (come `/etc/passwd`) o di una SUID binary, ovvero una binary di sistema avente il `setuid` bit abilitato [66].

Tale vulnerabilità è un bypass per diverse strutture di sicurezza a livello kernel, come Seccomp, AppArmor, SELinux e i moduli capability.

Per spiegare al meglio il funzionamento di Dirty Pipe, verrà illustrato uno scenario di penetrazione di un Apache Web Server in container Docker, esposto alla rete esterna tramite binding a una porta TCP dell'host.

La dimostrazione che segue è stata eseguita nel seguente contesto: sistema Ubuntu 20.04.3 con kernel hwe 5.11.0-27-generic, architettura AMD x86_64 e Docker Engine di versione trascurabile.

L'applicativo serve i contenuti tramite cgi-bin e usa una Bash con versione tra 4.1.0 e 4.3.0: questo permette a un attaccante esterno, dopo aver eseguito lo scan del dominio, di individuare una vulnerabilità a Shellshock sulla porta esposta dal container [67].

Shellshock permette di inviare una richiesta HTTP dove le variabili header sono eseguite dalla Bash come codice arbitrario, accodando codice Bash in coda alla funzione vuota `"() { :; };"`.

Essendo il container in comunicazione con l'ambiente esterno, è possibile chiedergli di aprire una comunicazione con un host remoto, inserendo in un header della richiesta, ad esempio l'header Cookie, un'espressione bash per aprire una reverse shell.

L'attaccante in entrata otterrà una bash nel container del servizio, in qualità di utente `www-data`, utente non-root definito nella configurazione di Apache.

Si supponga che, restaurati i path per le binary necessarie, sia possibile scrivere e compilare del codice in C all'interno del container: allora risulterebbe possibile usare Dirty Pipe per una privilege elevation locale, per poi completare una fuga in qualità di utente `root`.

Per la privilege elevation locale, si è deciso di creare uno script che sovrascrive ed esegue una SUID binary data in input, iniettandovi del codice eseguibile compilato per l'architettura apposita.

Lo script esegue determinati passaggi al fine di iniettare del codice eseguibile che generi una SUID shell.

Verifica la dimensione del codice eseguibile selezionato, valutando che questo sia inferiore alla dimensione delle pagine logiche meno 2 Byte. Questa dimensione è stata scelta al fine di rispettare le limitazioni dell'exploit: non sovrascrivere il primo e l'ultimo Byte della pagina logica. Inoltre, l'iniezione è possibile solo su una pagina logica, che nel nostro caso sarà la prima pagina logica della SUID binary;

Esegue il backup della binary selezionata, così da restaurarla dopo aver eseguito l'escalation. In base al numero di Byte letti, lo script valuta se sia possibile eseguire l'injection del codice eseguibile, il quale deve avere una dimensione maggiore di 1 Byte e minore del file scelto;

Riempie la pipe, occupando ogni page di ogni pipe_buffer, cosicchè il sistema applichi ad ogni pipe_buffer la flag PIPE_BUF_FLAG_CAN_MERGE [68], per poi svuotare la pipe. Le flag di ogni pipe_buffer rimangono tuttavia impostate, così da poter inserire i prossimi dati negli spazi liberi dei buffer già utilizzati;

RIFERIMENTI

- [1] Red Hat, «I vantaggi dei Container,» [Online]. Available:
<https://www.redhat.com/it/topics/containers>.
- [2] Aqua, «Container Images: Architecture and Best Practices,» [Online]. Available:
<https://www.aquasec.com/cloud-native-academy/container-security/container-images/>.
- [3] «A Qualitative and Quantitative Analysis of Container Engines,» [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2303.04080.pdf>.
- [4] «namespaces(7) - Linux manual page,» [Online]. Available:
<https://man7.org/linux/man-pages/man7/namespaces.7.html>.
- [5] «Linux namespaces - Wikipedia,» [Online]. Available:
https://en.wikipedia.org/wiki/Linux_namespaces.
- [6] «Chapter 1. Introduction to Control Groups,» [Online]. Available:
https://access.redhat.com/documentation/it-it/red_hat_enterprise_linux/7/html/resource_management_guide/chap-introduction_to_control_groups.
- [7] «1.2 Default Cgroup Hierarchies Red Hat Enterprise Linux 7 | Red Hat,» [Online]. Available: https://access.redhat.com/documentation/it-it/red_hat_enterprise_linux/7/html/resource_management_guide/sec-default_cgroup_hierarchies.
- [8] «PROCFS /proc/self - IBM Documentation,» [Online]. Available:
<https://www.ibm.com/docs/en/ztpf/1.1.0.15?topic=targets-procfs-procself>.
- [9] «Understanding the new control groups API [LWN.net],» [Online]. Available:
<https://lwn.net/Articles/679786/>.

- [10] «capabilities(7) - Linux manual page,» [Online]. Available:
] <https://man7.org/linux/man-pages/man7/capabilities.7.html>.
- [11] «Security/Sandbox/Seccomp - MozillaWiki,» [Online]. Available:
] <https://wiki.mozilla.org/Security/Sandbox/Seccomp>.
- [12] «seccomp(2) - Linux manual page,» [Online]. Available:
] <https://man7.org/linux/man-pages/man2/seccomp.2.html>.
- [13] «A seccomp overview [LWN.net],» [Online]. Available:
] <https://lwn.net/Articles/656307/>.
- [14] «Linux Security Module Usage --- The Linux Kernel Documentation,» [Online].
] Available: <https://www.kernel.org/doc/html/latest/admin-guide/LSM/index.html>.
- [15] «How SELinux separates containers using Multi-Level Security,» [Online].
] Available: <https://www.redhat.com/en/blog/how-selinux-separates-containers-using-multi-level-security>.
- [16] «QuickProfileLanguage Wiki AppArmor / AppArmor,» [Online]. Available:
] <https://gitlab.com/apparmor/apparmor/-/wikis/About>.
- [17] «QuickProfileLanguage Wiki AppArmor / AppArmor,» [Online]. Available:
] <https://gitlab.com/apparmor/apparmor/-/wikis/QuickProfileLanguage#file-rules>.
- [18] «Docker Overview | Docker Documentation,» [Online]. Available:
] <https://docs.docker.com/get-started/overview>.
- [19] «Develop with Docker Engine API | Docker Documentation,» [Online]. Available:
] <https://docs.docker.com/engine/api/>.
- [20] «dockerd | Docker Documentation,» [Online]. Available:
] <https://docs.docker.com/engine/reference/commandline/dockerd/>.
- [21] «What Is Containerd? | Docker,» [Online]. Available:
] <https://www.docker.com/blog/what-is-containerd-runtime/>.
- [22] «containerd/containerd: An open and reliable container runtime,» [Online].
] Available: <https://github.com/containerd/containerd>.
- [23] «Introducing runC: A lightweight universal container runtime | Docker,» [Online].
] Available: <https://www.docker.com/blog/runc/>.

- [24 «dockercon-2016,» [Online]. Available:
] <https://github.com/crosbymichael/dockercon-2016/tree/master/>.
- [25 «containerd/runtime/v2/README.md at main,» [Online]. Available:
] <https://github.com/containerd/containerd/blob/main/runtime/v2/>.
- [26 «unshare(2) - Linux manual page,» [Online]. Available:
] <https://man7.org/linux/man-pages/man2/unshare.2.html>.
- [27 «clone(2) | Linux manual page,» [Online]. Available: [https://man7.org/linux/man-](https://man7.org/linux/man-pages/man2/clone.2.html)
] [pages/man2/clone.2.html](https://man7.org/linux/man-pages/man2/clone.2.html).
- [28 «namespaces(7) - Linux manual page,» [Online]. Available:
] <https://man7.org/linux/man-pages/man7/namespaces.7.html>.
- [29 «Runtime metrics | Docker Documentation,» [Online]. Available:
] <https://docs.docker.com/config/containers/runmetrics/>.
- [30 «Docker run reference | Docker Documentation,» [Online]. Available:
] <https://docs.docker.com/engine/reference/run/>.
- [31 «Best practices for writing Dockerfiles | Docker Documentation,» [Online].
] Available: [https://docs.docker.com/develop/develop-images/dockerfile_best-](https://docs.docker.com/develop/develop-images/dockerfile_best-practices/)
[practices/](https://docs.docker.com/develop/develop-images/dockerfile_best-practices/).
- [32 «Dockerfile reference | Docker Documentation,» [Online]. Available:
] <https://docs.docker.com/engine/reference/builder/>.
- [33 «Use The OverlayFS Storage Driver | Docker Documentation,» [Online].
] Available: <https://docs.docker.com/storage/storagedriver/overlayfs-driver/>.
- [34 «docker/docs/userguide/storagedriver at main,» [Online]. Available:
] [https://github.com/tnozicka/docker/blob/master/docs/userguide/storagedriver/overl](https://github.com/tnozicka/docker/blob/master/docs/userguide/storagedriver/overlayfs-driver.md)
[ayfs-driver.md](https://github.com/tnozicka/docker/blob/master/docs/userguide/storagedriver/overlayfs-driver.md).
- [35 «kernel.org,» [Online]. Available:
] <https://www.kernel.org/doc/Documentation/filesystems/overlayfs.txt>.
- [36 «Volumes | Docker Documentation,» [Online]. Available:
] <https://docs.docker.com/storage/volumes/>.
- [37 «docker network | Docker Documentation,» [Online]. Available:
] <https://docs.docker.com/engine/reference/commandline/network/>.

- [38] «None network driver | Docker Documentation,» [Online]. Available:
] <https://docs.docker.com/network/drivers/none/>.
- [39] «Host network driver | Docker Documentation,» [Online]. Available:
] <https://docs.docker.com/network/drivers/host/>.
- [40] «Bridge network driver | Docker Documentation,» [Online]. Available:
] <https://docs.docker.com/network/drivers/bridge/>.
- [41] «Networking Overview | Docker Documentation,» [Online]. Available:
] <https://docs.docker.com/network/>.
- [42] «Network Containers | Docker Documentation,» [Online]. Available:
] <https://docs.docker.com/engine/tutorials/networkingcontainers/>.
- [43] «Seccomp security profiles for Docker,» [Online]. Available:
] <https://docs.docker.com/engine/security/seccomp/>.
- [44] «AppArmor security profiles for Docker | Docker Documentation,» [Online].
] Available: <https://docs.docker.com/engine/security/apparmor/>.
- [45] «Browser Information Discovery, Technique T1217 - Enterprise | MITRE
] ATT&CK,» [Online]. Available: <https://attack.mitre.org/techniques/T1217/>.
- [46] «Initial Access, Tactic TA0001 - Enterprise | MITRE ATT&CK,» [Online].
] Available: <https://attack.mitre.org/tactics/TA0001/>.
- [47] «Privilege Escalation, Tactic TA0004 - Enterprise | MITRE ATT&CK,» [Online].
] Available: <https://attack.mitre.org/tactics/TA0004/>.
- [48] «SecurityTeam/Roadmap/KernelHardening - Ubuntu Wiki,» [Online]. Available:
] https://wiki.ubuntu.com/SecurityTeam/Roadmap/KernelHardening#ptrace_Protection.
- [49] «User Mode Linux HOWTO --- The Linux Kernel Documentation,» [Online].
] Available: https://www.kernel.org/doc/html/v5.9/virt/uml/user_mode_linux.html.
- [50] «linux/kernel/umh.c at master - torvalds/linux,» [Online]. Available:
] <https://github.com/torvalds/linux/blob/master/kernel/umh.c>.
- [51] «Control Groups --- The Linux Kernel documentation,» [Online]. Available:
] <https://www.kernel.org/doc/html/v5.14/admin-guide/cgroup-v1/cgroups.html>.

- [52] «linux/kernel/cgroup/cgroup-v1.c at master · torvalds/linux», [Online]. Available:
] <https://github.com/torvalds/linux/blob/master/kernel/cgroup/cgroup-v1.c>.
- [53] gnu.org, «mtab», [Online]. Available:
] <https://www.gnu.org/software/hurd/hurd/translator/mtab.html>.
- [54] «proc(5) --- Linux manual pages», [Online]. Available:
] <https://web.archive.org/web/20160303182044/http://manpages.courier-mta.org/htmlman5/proc.5.html>.
- [55] «core(5) - Linux manual page», [Online]. Available: [https://man7.org/linux/man-](https://man7.org/linux/man-pages/man5/core.5.html)
] [pages/man5/core.5.html](https://man7.org/linux/man-pages/man5/core.5.html).
- [56] «linux/fs/coredump.c at master · torvalds/linux», [Online]. Available:
] <https://github.com/torvalds/linux/blob/master/fs/coredump.c>.
- [57] «Breaking out of Docker via RunC -- Explaining CVE-2019-5736», [Online].
] Available: <https://unit42.paloaltonetworks.com/breaking-docker-via-runc-explaining-cve-2019-5736/>.
- [58] «DOcker Engine 18.09 release notes | Docker Documentation», [Online].
] Available: <https://docs.docker.com/engine/release-notes/18.09/#18092>.
- [59] «Continuous Integration with Docker | Docker Documentation», [Online].
] Available: <https://docs.docker.com/build/ci/>.
- [60] «traefik - Official Image | Docker Hub», [Online]. Available:
] https://hub.docker.com/_/traefik.
- [61] «requests.adapters --- Requests 2.31.0 documentation», [Online]. Available:
] https://requests.readthedocs.io/en/latest/_modules/requests/adapters/.
- [62] «New Linux Vulnerability CVE-2022-0492 Affecting cgroups», [Online].
] Available: <https://unit42.paloaltonetworks.com/cve-2022-0492-cgroups/>.
- [63] «Ubuntu Manpage: user_namespaces», [Online]. Available:
] https://manpages.ubuntu.com/manpages/xenial/man7/user_namespaces.7.html.
- [64] «cgroup_namespaces(7) - Linux manual page», [Online]. Available:
] https://www.man7.org/linux/man-pages/man7/cgroup_namespaces.7.html.
- [65] «The Dirty PIpe VULnerability», [Online]. Available:
] <https://dirtypipe.cm4all.com/>.

- [66 man.freebsd.org, «chmod,» [Online]. Available:
] <https://man.freebsd.org/cgi/man.cgi?query=chmod>.
- [67 «CVE - CVE-2014-6271,» [Online]. Available: [https://cve.mitre.org/cgi-](https://cve.mitre.org/cgi-bin/cvename.cgi?name=cve-2014-6271)
] [bin/cvename.cgi?name=cve-2014-6271](https://cve.mitre.org/cgi-bin/cvename.cgi?name=cve-2014-6271).
- [68 «linux/include/linux/pipe_fs_i.h - torvalds/linux - Github,» [Online]. Available:
] https://github.com/torvalds/linux/blob/master/include/linux/pipe_fs_i.h.