Inicialização e geração de iDVVs com Intel SGX / OpenSGX (Versão Estendida)

Rodrigo Masera de Souza¹, Rodrigo Bisso Machado¹, Diego Kreutz¹

¹Ciência da Computação (CC) Laboratório de Estudos Avançados (LEA) Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA)

{rodrigomsr2, rodrigobissomachado}@gmail.com, kreutz@unipampa.edu.br

Abstract. High quality and low-cost cryptographic material generators (e.g. secret keys, nonces), such as iDVV, by themselves, are not enough to ensure the confidentiality of sensitive data. Malicious insiders and external attackers can still compromise the machine and get access to the sensitive data. In this paper, we propose Intel SGX for ensuring the integrity and confidentiality of iDVVs, which are secret codes used for encryption and message authentication in programmable networks. Using OpenSGX enclaves, we discuss the implementation and evaluation of an iDVV generator. Our findings show SGX is a viable alternative to solve the problem.

Resumo. Mecanismos de geração de material criptográfico (e.g. chaves secretas, nonces) de alta qualidade e baixo custo, como o iDVV, por si só, não garantem a confidencialidade desses dados sensíveis em caso de usuários internos maliciosos ou comprometimento da máquina por atacantes externos. Este trabalho investiga a utilização da tecnologia Intel[®] SGX para isolar e garantir a integridade e a confidencialidade de iDVVs, códigos secretos utilizados para cifragem e autenticação de mensagens em redes programáveis. Uma discussão da implementação e avaliação de um inicializador e gerador de iDVVs, utilizando enclaves OpenSGX, é apresentada neste artigo. Os resultados sugerem que a utilização de SGX é uma alternativa viável para resolver o problema.

1. Introdução

Em redes programáveis, mais conhecidas como SDN (*Software-Defined Networking*), a segurança dos canais de comunicação entre os dispositivos de encaminhamento e os controladores é de suma importância [Kreutz et al. 2013, Kreutz 2013, Kreutz et al. 2014, Samociuk 2015, Scott-Hayward et al. 2016, Kreutz et al. 2018a]. Soluções de baixo custo computacional para geração de material criptográfico de qualidade, como iDVV (*integrated Device Verification Value*) [Kreutz et al. 2018b], e bibliotecas de criptografia de alto desempenho, como NaCL [Bernstein et al. 2012], representam uma opção atrativa às soluções tradicionais (e.g. PKI + OpenSSL) devido à limitada capacidade computacional dos dispositivos de encanamentos [Kreutz et al. 2015, Samociuk 2015, Kreutz et al. 2017a, Kreutz et al. 2017b] e a grande demanda de computação dos controladores em ambiente como data centers, onde a demanda pode chegar a 20 milhões de novos fluxos de rede por segundo [Kreutz et al. 2015, Kreutz et al. 2018b].

Um iDVV representa um material criptográfico (e.g. chave secreta, nonce) de alta qualidade (valor pseudo-aleatório de boa entropia) e baixo custo computacional.

Os geradores de iDVVs podem ser inicializados através de serviço como um centro de distribuição de chaves (KDC) [Kreutz et al. 2017a, Kreutz et al. 2017b] ou de forma independente, entre dois dispositivos quaisquer, utilizando uma solução baseada em Diffie-Hellamn (DH), funções pseudo-aleatórias (PRF) e funções de derivação de chaves (KDF) [Masera et al. 2018]. Entretanto, ambas as soluções, apesar de garantirem a geração de material criptográfico de alta qualidade, por si só, não garantem a confidencialidade da inicialização, geração e utilização das informações sensíveis em caso de comprometimento do dispositivo de encaminhamento ou do controlador, por exemplo. Na prática, o comprometimento de um dispositivo pode levar a vários problemas de segurança na rede [Kreutz et al. 2013, Scott-Hayward et al. 2016, Kreutz et al. 2018a]. Por exemplo, um atacante, atuando de forma passiva em um dispositivo comprometido, pode ler e analisar o tráfego do plano de controle do dispositivo uma vez que as chaves secretas de sessão são, a partir do momento da intrusão, conhecidas pelo atacante. O atacante pode também forjar solicitações em nome do dispositivo, interferindo de forma ativa no tráfego de dados da rede através do dispositivo comprometido. Como forma de resolver o problema, este trabalho propõe a utilização de tecnologias de computação confiável, como Intel® SGX (Software Guard Extensions) [Costan et al. 2017a, Costan et al. 2017b].

As tecnologias de hardware para computação confiável, também conhecidas como *Trusted Execution Environments* (TEEs), ganharam um significativo impulso nos últimos anos. Entre os principais motivadores do grande avanço em pesquisa e desenvolvimento de TEEs estão os crescentes vazamentos de dados privados e o comprometimento de material criptográfico sensível causado por usuários maliciosos internos (*insider threats*) e invasões de sistemas causadas por atacantes externos [Bisson 2018, AO Kaspersky Lab. 2017, InfoWatch 2017]. A tecnologia Intel® SGX, que já começou a entrar no mercado de hardware de prateleira, oferece aos usuários a possibilidade de ter um TEE de baixo custo. Apesar dos atuais desafios de segurança do SGX (e.g. [Gotzfried et al. 2017, Van Bulck et al. 2018]), há vários pesquisadores e empresas investindo significativamente na aplicação, desenvolvimento e evolução da tecnologia [Brito and Fetzer 2018, Schwarz et al. 2017].

SGX permite que um aplicativo, ou seu sub-componente, seja executado em um ambiente de execução isolado, denominado de *enclave*. O hardware Intel[®] SGX protege o *enclave* contra qualquer software malicioso, incluindo sistema operacional, hypervisor e firmware de baixo nível, que possa vir a tentar comprometer a integridade do *enclave* ou roubar informações sigilosas como chaves secretas [Costan et al. 2017a, Costan et al. 2017b, Jain et al. 2016]. Em resumo, esta tecnologia garante a inicialização e execução de programas em *enclaves*, que utilizam uma memória protegida, impedindo o comprometimento da integridade e confidencialidade dos dados em tempo de execução.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar, discutir e avaliar um gerador de iDVVs baseado na tecnologia Intel[®] SGX. Para viabilizar a implementação e avaliação sem a necessidade de aquisição de hardware específico, pode ser utilizado o emulador SGX denominado OpenSGX [Jain et al. 2016] (https://github.com/sslab-gatech/opensgx). Este emulador permite a implementação, execução e avaliação de programas em *enclaves* SGX. Os resultados, apresentados na Seção 4, sugerem que a utilização de SGX é uma alternativa viável para cenários onde a prioridade é a segurança, ou seja, garantir a integridade e confidencialidade dos geradores e respectivos

iDVVs.

As principais contribuições do trabalho são a

- (c_1) introdução da tecnologia Intel[®] SGX e OpenSGX no contexto da segurança de material criptográfico em redes programáveis;
- (c₂) implementação e avaliação da inicialização do gerador de iDVVs, baseada no método DH + PRF + KDF [Masera et al. 2018], utilizando OpenSGX; e
- (c_3) discussão dos resultados e apresentação de caminhos futuros de investigação.

O restante deste trabalho está organizado como segue. A Seção 2 introduz os conceitos de iDVV, Intel[®] SGX e OpenSGX. Na sequência, a implementação da solução proposta é discutida na Seção 3. Por fim, os resultados, os trabalhos relacionados e as considerações finais e trabalhos futuros são apresentados nas Seções 4, 5 e 6, respectivamente.

2. Background

Esta seção introduz os conceitos de iDVV, Intel® SGX e OpenSGX.

2.1. iDVV

Um iDVV é gerado a partir de um mecanismo que produz valores pseudo-aleatórios, de maneira determinística, e pode ser utilizado como material criptográfico forte e de uso genérico (e.g. chave simétrica secreta, nonce) [Kreutz et al. 2018b, Kreutz et al. 2017a]. Um iDVV é inicializado a partir de valores pseudo-aleatórios de alta entropia, mais especificamente uma chave secreta e uma semente, ambos fornecidos por um KDC [Kreutz et al. 2018a, Kreutz et al. 2017b]. Depois de inicializado, o iDVV pode ser utilizado de forma síncrona entre as entidades comunicantes A e B, sem nenhuma troca de informação, através da rede, sobre os dados utilizados para inicializar ou atualizar o iDVV. Na prática, iDVVs podem ser utilizados em diferentes contextos, como protocolos de comunicação produtor-consumidor utilizando canais de comunicação confiáveis ou não, protocolos sem conexão como UDP, protocolos orientados a conexão, entre outros [Kreutz et al. 2018b, Kreutz et al. 2017a].

Por ser um mecanismo simples e eficiente, o iDVV pode ser utilizado de diferentes formas: 1) por mensagem; 2) por sequência de mensagens; 3) por intervalo de tempo e 4) por sessão de comunicação. Um dos motivos do iDVV ser considerado uma boa alternativa em alguns cenários, em relação aos algoritmos e soluções tradicionais, se explica por ele ser gerado localmente nas máquinas, ao invés de ser acordado por mensagens. Outro motivo é o fato de a geração de um iDVV ser de baixíssimo custo, sendo uma boa opção para cenários que demandam uma chave secreta forte, por mensagem, e alto desempenho, por exemplo. Segundo estudos recentes, os geradores de iDVVs possuem uma latência várias vezes menor quando comparados com funções e protocolos tradicionais, como randombytes () da NaCL, funções tradicionais de derivação de chaves e soluções baseadas exclusivamente no Diffie-Hellman [Kreutz et al. 2018b, Kreutz et al. 2017a].

2.2. Intel® SGX

Intel[®] SGX é uma extenção da arquitetura do conjunto de instruções x86. SGX usa hardware específico para possibilitar a execução segura de contêineres chamados *enclaves*.

A região de memória que reside no *enclave* é protegida contra todo tipo de acesso externo, incluindo acesso privilegiado do sistema operacional ou hypervisor. Cada *enclave* é isolado e suporta selamento de dados (*sealing*, atestação local e remota.

O isolamento do *enclave* busca garantir a confidencialidade e a integridade dos dados e código sendo executado dentro do *enclave*. O isolamento é reforçado pela memória reservada do processador configurada durante o processo de boot. Essa região de memória somente pode ser acessada pelo microcode SGX e programas executando dentro do *enclave*.

Enclaves SGX são identificados unicamente pelo *Enclave Control Structure*, que contém um *digest* de 256 bits de um log criptográfico gravado no processo de compilação do *enclave*. Esta informação é utilizada para produzir uma chave de selamento gerada pelo hardware. A chave de selamento depende do *digest* e da chave do hardware, o que significa que os dados selados (cifrados) só podem ser decifrados pelo *enclave* que os selou. Isto garante um armazenamento seguro (i.e. confidencial e onde a integridade pode ser verificada) dos dados e código dos *enclaves*.

A atestação local possibilita que um *enclave* E1 autentique o programa que está executando em outro *enclave* E2. Para realizar a atestação, é utilizada uma cópia assinada do *digest* da selagem dos dados do E2 e o protocolo Diffie-Hellman para auxiliar na autenticação da integridade de um programa P1 num *enclave* E2.

A atestação remota é implementada usando o processo de atestação local em conjunto com um par de *enclaves* de autoria da Intel (um *enclave* de aprovisionamento e um *enclave* de referência). O *enclave* de aprovisionamento requisita uma chave de atestação da Intel e armazena-a de forma selada, limitando o acesso e derivação de chaves aos *enclaves* de autoria da Intel. O *enclave* de referência requer a chave de atestação, verifica a medição usando atestação local e assina a medida junto com uma mensagem opcional. O par medida-mensagem, chamado de *quote*, pode ser verificado usando o Intel *Attestation Service* [Gueron 2016, Costan et al. 2017a, Costan et al. 2017b, Birrell et al. 2018].

2.3. OpenSGX

OpenSGX é um emulador para Intel[®] SGX no nível de instrução, estendendo o emulador de código aberto QEMU [Jain et al. 2016]. Em particular, OpenSGX faz uso da tradução binária do espaço de usuário do QEMU para implementar as instruções SGX. Vale ressaltar que o OpenSGX não é apenas um emulador de instruções SGX. Ele consiste em uma plataforma completa, que inclui uma camada e serviços emulados do sistema operacional, um carregador / pacote de programas *enclave*, bibliotecas de usuário, suporte a depuração e monitoramento de desempenho. Como o OpenSGX é implementado em software, ele permite fácil instrumentação em praticamente todos os aspectos SGX, como componentes de hardware e software de sistema, além de esquemas de criptografia de memória. Além de seu uso para pesquisa, o OpenSGX pode ser usado para desenvolver aplicativos SGX, pois é uma plataforma independente, que fornece execução isolada e atestação remota.

Enquanto as especificações de instruções e estruturas de dados do Intel[®] SGX são descritas em detalhes, outros componentes são mal especificados, como suporte a software de sistema e APIs [Jain et al. 2016]. Isso faz com que cresça o número de questões não-triviais. Por exemplo, muitas das instruções do Intel[®] SGX são de *ring 0*, o que requerem privilégios de kernel. Isso implica que o sistema operacional, uma entidade

não confiável, forneça serviços. Estas são algumas das questões que foram levadas em consideração no projeto e implementação do OpenSGX, transformando-o em uma plataforma mais atrativa para desenvolvedores de aplicações. Além disso, devido a mecanismos adicionais de segurança, o OpenSGX foi projetado para evitar potenciais ataques resultantes das instruções *ring 0*.

3. Implementação

Recentemente, os autores propuseram um método para inicializar os geradores dos iDVVs que não depende de um KDC [Masera et al. 2018]. Este método permite que duas entidades (e.g. dispositivos de rede) A e B quaisquer, sem intermédio de uma terceira parte, estabeleçam canais de comunicação seguros utilizando iDVVs. Para isso, foi criados e avaliados diferentes métodos, entre os quais foi selecionado o método denominado DH+PRF+KDF, que é utilizado apenas para inicializar os geradores de iDVVs, mais especificamente, atribuir os valores iniciais da semente (seed) e chave (key) utilizados no bootstrap do gerador.

O método DH+PRF+KDF utiliza o algoritmo de Diffie-Hellman (DH), para gerar uma chave simétrica chamada de chave pré-mestra. Esta chave, juntamente com um valor pseudo-aleatório, é utilizada como entrada para uma função pseudo-aleatória (PRF), cuja saída é a chave mestra. A partir deste ponto são derivadas (KDF) as chaves e sementes para a inicialização dos diferentes geradores de iDVVs. A implementação da solução foi realizada na linguagem de programação Python.

O porte do método DH+PRF+KDF para OpenSGX, cujos trechos de código são apresentados na Listing 1, exigiu a troca de linguagem de programação, pois SGX e OpenSGX suportam apenas a linguagem de programação C. Portanto, o método teve de ser portado de Python para C, implicando na troca de bibliotecas e funções providas pelo ambiente de desenvolvimento da solução original. Vale ressaltar que, para fins de comparação (ver Seção 4), foram implementadas duas versões (em C) do método, uma para OpenSGX e outra para um ambiente Linux tradicional.

No caso do OpenSGX, foram utilizadas apenas bibliotecas padrão da linguagem C, APIs OpenSGX e os portes das bibliotecas de criptografia PolarSSL e OpenSSL. Como pode ser observado no trecho de código da Listing 1, há funções específicas do ambiente SGX, como enclave_main() (ao invés da tradicional função main()), sgx_write_sock(), sgx_write_sock() e sgx_exit() (linhas 4, 8, 11 e 26, respectivamente). As funções Diffie_Hellman(), PRF() e KDF() (linhas 14, 17 e 20) representam implementações destas funções em linguagem C, seguindo as definições apresentadas em [Masera et al. 2018]. Por fim, o gerador de iDVVs é inicializado com a chamada da função iddv_init() (linha 24).

Para implementar as funções PRF () e iddv_init (), foram utilizadas as primitivas criptográficas SHA256 e HMAC-SHA256, através das funções sha256() e sha256_hmac() da biblioteca PolarSSL. Estas funções são necessárias à segurança da comunicação entre os dispositivos e são utilizadas para gerar valores pseudo-aleatórios (SHA256 e HMAC-SHA256) e códigos de autenticação (HMACs) que asseguram a integridade e autenticidade das mensagens.

```
#include "test.h"
2 #include "polarssl/sha256.h"
```

```
4 void enclave_main()
5 {
6
      // envia parametros Diffie-Hellman
      sgx_write_sock(client_fd, buffer, len(buffer));
      // recebe parametros Diffie-Hellman
10
      sgx_read_sock(client_fd, buffer, size(buffer));
11
12
      // calcula chave secreta pre-mestra
13
      preMasterSecret = Diffie_Hellman(clientPubKey, privKey, modulus);
14
      // calcula chave mestra
16
      masterSecret = PRF(preMasterSecret, prf_seed);
17
18
      // deriva a chave secreta e a seed da chave mestra
19
      idvv_key = KDF(masterSecret, kdf_seed, 3);
20
      idvv_seed = KDF(masterSecret, kdf_seed+idvv_key, 3);
21
      // inicializa o gerador de iDVVs
      iddv_init(idvv_seed, idvv_key);
25
      sgx_exit(NULL);
26
27 }
```

Listing 1. Implementação utilizando OpenSGX

4. Resultados

Esta seção apresenta uma avaliação e comparação de desempenho das duas novas implementações do método DH+PRF+KDF. Como dito anteriormente, as implementações foram realizadas na linguagem de programação C, sendo uma para OpenSGX (https://github.com/sslab-gatech/opensgx, versão de setembro de 2018) e outra para rodar em sistemas GNU/Linux.

O objetivo da avaliação foi comparar as duas implementações do método para verificar os eventuais gargalos ou overheads da tecnologia SGX, uma vez que uma das principais vantagens dos iDVVs são o baixo custo computacional e o alto desempenho. Os testes foram realizados em uma máquina virtual (MV) VirtualBox, com 1 GB de memória, 1 core e sistema operacional Ubuntu Server 16.04. A MV foi executada num notebook HP 14-d030br, Intel core i5, 2^a geração, 8GB de RAM e 240GB de SSD, rodando Ubuntu 17.10. Foram executados três testes distintos, um na plataforma OpenSGX, um no modo usuário do QEMU e um terceiro nativo GNU/Linux. O modo usuário do QEMU foi utilizado pelo fato de o OpenSGX utilizar o QEMU. Portanto, a execução sobre o QEMU fornece uma base de comparação mais justa.

As ferramentas perf e gcc foram utilizadas para coletar os dados de execução dos programas. Foram realizadas 1.000 execuções para avaliação da função idvv_next(), da primitiva criptográfica sha256() e do tempo de execução, a partir dessa execuções foram retiradas as média de cada um dos valores obtidos.

Os resultados estão resumidos na Tabela 1. Foram levados em consideração cinco parâmetros de avaliação e comparação, sendo eles o tempo total de execução, número

de ciclos de CPU, número de instruções, tempo da função idvv_next(), tempo da função de hash SHA256(). Os tempos são todos em milisegundos (ms). Como esperado, a execução **nativa** apresenta o melhor desempenho, pois não carrega consigo a sobrecarga da emulação. Já o cenário **QEMU**, apesar de o número de instruções e ciclos de CPU permanecerem os mesmos, reduz consideravelmente o desempenho uma vez que o mesmo código da execução **nativa**, compilado estaticamente, está agora sendo executado sobre o emulador QEMU. Devido a isso, o tempo total de execução aumenta em 28x. Entretanto, pode-se observar que o tempo de execução da função geradora de iDVVs, idvv_next(), aumentou apenas 7x. Isto significa que o maior overhead da emulação está na inicialização da execução e não na execução das funções propriamente ditas.

Parâmetro	Nativo	QEMU	OpenSGX
Tempo de execução (ms)	0, 26	7,58	136,66
Ciclos de CPU	1.520.638	1.520.638	4.812.588
Número Instruções	825	825	2611
Tempo idvv_next()	0,0098	0,0726	33, 29
Tempo SHA256()	0,0059	0,0297	16, 1153

Tabela 1. Comparação das execuções nativa, QEMU e OpenSGX

No terceiro cenário, execução com **OpenSGX**, há um aumento de 18x no tempo total de execução quando comparado com o cenário equivalente, o **QEMU**. Entretanto, vale ressaltar que o código está sendo executado sobre uma emulação OpenSGX em um emulador QEMU, ou seja, há dois níveis de emulação. Além disso, o código OpenSGX possui certa de 3x mais instruções assembler e ciclos de CPU. De qualquer forma, num hardware Intel[®] SGX, essa diferença deve cair uma vez que o desempenho de um código rodando em um *enclave* SGX é superior ao desempenho do mesmo código rodando no emulador OpenSGX. Em outras palavras, há um overhead menor entre um programa Intel i386 e o mesmo programa em Intel[®] SGX.

O overhead da tecnologia SGX ocorre por dois motivos [Arnautov et al. 2016]: (1) enclaves consideram o kernel do sistema operacional inseguro; e (2) baixo desempenho em memória. O primeiro motivo retrata as consequências de encapsular informação do sistema operacional, que ocorre quando uma thread precisa realizar chamadas de sistema, onde o contexto do enclave deve ser salvo antes que a informação possa ser enviada à memória para a realização da chamada de sistema. Esta operação acaba sendo cara já que envolvem operações de entrada e saída, ou seja, leitura e escrita. O baixo desempenho em memória é resultado direto dos mecanismos de segurança do SGX. Quando ocorre um cache-miss, as linhas de cache devem ser decifradas antes de realizar uma busca na memória, o que significa uma operação adicional custosa, gerando um overhead significativo. Este é um dos principais trade-offs entre segurança e desempenho no contexto da tecnologia SGX.

Apesar de existir uma sobrecarga que não deve ser desprezada com SGX, a decisão entre utilizar ou não a tecnologia deve levar em conta o *trade-off* desempenho-segurança. Se o desempenho tem prioridade sobre a segurança, então recomenda-se a utilização da tecnologia SGX somente para a inicialização dos geradores de iDVVs. Neste caso, depois da inicialização, o gerador irá manter o estado interno em memória insegura. Entretanto, um atacante conseguirá comprometer apenas as sessões atual e futuras uma vez

que o iDVV evolui de forma irreversível, isto é, o gerador de iDVV fornece a propriedade de segurança conhecida por *perfect forward secrecy* (PFS). Mesmo que o atacante tenha uma cópia (cifrada) de todas as comunicações passadas entre duas entidades A e B, ele não conseguirá comprometer a confidencialidade sem conhecer os dados originais de inicialização, que estão disponíveis somente dentro de um *enclave* SGX.

Por outro lado, se a segurança é a maior prioridade, recomenda-se a utilização de soluções baseadas em SGX, ou seja, deixar tanto a inicialização quanto a geração dos iDVVs dentro de *enclaves* SGX. Por fim, vale lembrar que Intel[®] SGX é uma tecnologia nova, ou seja, ela tende a evoluir significativamente nos próximos anos. Esta evolução irá, como uma boa probabilidade, levar em conta o desempenho, como tem ocorrido com praticamente todos mecanismos e recursos de segurança (e.g. conjunto de instruções AES) suportadas em hardware.

5. Trabalhos Relacionados

Ataques à memória do sistema (DRAM) de um dispositivo de computação representam uma ameaça cada vez mais preocupante. Estudos recentes mostram que mais de 70% dos vazamentos de dados sensíveis são causados por usuários maliciosos internos (*insider threats*) e atacantes externos que comprometem o sistema [InfoWatch 2017], garantindo acesso aos dados em memória volátil e/ou persistente. A tecnologia Intel[®] SGX nasceu como uma forma prática e de baixo custo de mitigar o impacto negativo causado por sistemas comprometidos. A ideia é que um programa, executando em um *enclave* SGX, tenha a integridade e a confidencialidade dos dados sensíveis garantida através de uma memória segura.

O componente de hardware do SGX que fornece a proteção necessária para a DRAM é o *Memory Encryption Engine* (MEE) [Gueron 2016]. O projeto do MEE é baseado nos seguintes pilares: uma árvore de integridade, primitivas criptográficas, códigos de autenticação de mensagens (MACs) e um mecanismo *anti-replay*. Diferentes árvores de integridade usam várias combinações de contadores e tags MAC (ou hashes), oferecendo compensações entre o tamanho do armazenamento interno e a região DRAM necessária, o custo/complexidade dos fluxos de verificação de árvore e atualização de árvore, e o desempenho resultante. A escolha das primitivas criptográficas é crítica para alcançar o nível adequado de segurança e, ao mesmo tempo, satisfazer as restrições de engenharia. O MEE utiliza técnicas de criptografia paralelizáveis e um algoritmo MAC que produz tags MAC curtas utilizando uma implementação em hardware de baixo custo.

A utilização da tecnologia SGX ainda apresenta alguns desafios em termos de complexidade. Recentemente, o sistema PANOPLY [Shinde et al. 2017] foi proposto como forma de preencher a lacuna entre as abstrações nativas do SGX e as abstrações padrão de um sistema operacional. O PANOPLY disponibiliza micro-containers (microns), que são unidades de código e dados isolados em *enclaves* SGX. Os microns expõe as abstrações POSIX padrão à lógica do aplicativo, incluindo acesso a sistemas de arquivos, rede, multi-threading, multiprocessamento e primitivas de sincronização de threads. Além disso, PANOPLY aplica uma propriedade de integridade para as interações intra*enclave*, garantindo que a execução do aplicativo siga o controle legítimo e o fluxo de dados mesmo se o sistema operacional se comportar de maneira inesperada.

Diferentemente de outras tecnologias com os mesmos objetivos finais (e.g. ARM

TrustZone, RISC-V MultiZone, Intel TET, AMD PSP e SEE, *Tamper Resistant FPGAs*, *Hardware Security Modules* (HSMs)), as aplicações da tecnologia SGX são as mais variadas possíveis uma vez que um *enclave* SGX suporta a execução de aplicações quaisquer. Por exemplo, o SGX-Log [Karande et al. 2017] é uma solução, baseada em SGX, para garantir integridade dos logs de sistema. Qualquer administrador de sistemas sabe que proteger registros (logs) de sistema é considerado um dos pontos de críticos de segurança em sistemas computacionais. Logs guardam diferentes informações sobre as atividades do sistema e de programas, incluindo eventos de sistema, alterações de configurações, utilização de recursos e atividades de usuários. O SGX-Log segue o padrão do sistema de log do Linux, o *syslog*, e garante a proteção dos logs dentro e fora dos *enclaves* utilizando as primitivas de sealing e unsealing fornecidas pelo SGX.

Como forma de propagar a utilização e o desenvolvimento da tecnologia SGX, um grupo de pesquisadores desenvolveu o OpenSGX [Jain et al. 2016], um software que emula o Intel[®] SGX. O OpenSGX abstrai as instruções de hardware SGX através de uma API de alto nível para a programação de aplicações seguras. Este emulador pode ser considerado uma forma simples e prática de implementar e avaliar soluções baseadas em SGX.

Similar a tecnologia SGX, outras soluções tem surgido, em particular em contextos mais limitados, como sistemas embarcados de baixo custo. TrustLite [Koeberl et al. 2014] é um exemplo de uma arquitetura de segurança de hardware genérica para o isolamento de software em dispositivos embarcados de baixo custo. Incorporando uma *Execution-Aware Memory Protection Unit* (EA-MPU), como uma generalização de esquemas de proteção de memória para dispositivos de baixo custo, é possível realizar alocação e associação flexível de memória sem sobrecarregar a CPU. O TrustLite introduz também uma seqüência simples de *Secure Loader* como forma de mitigar o problema de vazamento de informações na reinicialização da plataforma.

Nos últimos anos, as tecnologias para garantir a integridade e confidencialidade de dados em memória vem evoluindo e tornando-se uma realidade. O objetivo deste trabalho foi investigar algumas dessas novas tecnologias e aplicar num caso prático específico, um novo método de inicialização dos geradores de iDVV proposto recentemente pelos autores [Masera et al. 2018]. Devido a fatores como baixo custo, crescente disponibilidade e utilização prática no mercado corporativo e acadêmico e ser projetada para aplicações em geral (i.e. qualquer tipo de aplicação convencional), a tecnologia escolhida foi a Intel[®] SGX.

6. Considerações Finais

A tecnologia Intel[®] SGX vem sendo utilizada na prática por um número crescente de empresas e centros de pesquisa. Sua entrada no mercado já é uma realidade, contando com exemplos dos mais diversos tipos de aplicações práticas. Os principais benefícios são baixo custo, crescente disponibilidade e utilização prática no mercado corporativo e acadêmico e ser projetada para aplicações em geral (i.e. qualquer tipo de aplicação convencional). Além disso, existe uma plataforma de emulação SGX, denominada de OpenSGX.

A implementação do método de inicialização de geradores de iDVVs, conhecido como DH+PRF+KDF, na plataforma OpenSGX, se mostrou viável na prática. Apesar do

overhead de execução, identificado nos testes prático, esta solução, baseada na tecnologia SGX, pode ser utilizada na prática considerando dois casos em particular. O primeiro é o caso de cenários onde o desempenho tem prioridade sobre a segurança. Nestes casos, recomenda-se a utilização da tecnologia SGX somente para a inicialização dos geradores de iDVVs, como discutido na seção 4. Por outro lado, se a segurança é a maior prioridade, recomenda-se a utilização de soluções completamente baseadas em SGX, ou seja, deixar tanto a inicialização quanto a geração dos iDVVs dentro de *enclaves* SGX.

Como trabalhos futuros podem ser mencionados: (1) investigar o overhead da solução em máquinas que oferecem as últimas gerações da tecnologia Intel[®] SGX; (2) analisar o impacto de diferentes ataques contra os *enclaves* SGX que suportam os geradores de iDVVs; (3) realizar um estudo de viabilidade técnica e comercial de inclusão da tecnologia SGX em dispositivos de rede, como comutadores.

Referências

- AO Kaspersky Lab. (2017). Top 5 largest data leaks of 2017 so far. https://www.kaspersky.com/blog/data-leaks-2017/19723/.
- Arnautov, S., Trach, B., Gregor, F., Knauth, T., Martin, A., Priebe, C., Lind, J., Muthukumaran, D., O'keeffe, D., Stillwell, M., et al. (2016). SCONE: Secure Linux Containers with Intel SGX. In *OSDI*, volume 16, pages 689–703.
- Bernstein, D., Lange, T., and Schwabe, P. (2012). The security impact of a new cryptographic library. In *Progress in Cryptology LATINCRYPT 2012*, volume 7533 of *LNCS*, pages 159–176. Springer.
- Birrell, E., Gjerdrum, A., van Renesse, R., Johansen, H., Johansen, D., and Schneider, F. B. (2018). Sgx enforcement of use-based privacy. https://www.cs.cornell.edu/fbs/publications/UBP.SGX.pdf.
- Bisson, D. (2018). The 10 biggest data breaches of 2018 (so far). https://blog.barkly.com/biggest-data-breaches-2018-so-far.
- Brito, A. and Fetzer, C. (2018). Securecloud: Secure big data processing in untrusted clouds. In 2018 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W), pages 53–54.
- Costan, V., Lebedev, I., and Devadas, S. (2017a). Secure processors part i: Background, taxonomy for secure enclaves and intel sgx architecture. *Foundations and Trends*® *in Electronic Design Automation*, 11(1-2):1–248.
- Costan, V., Lebedev, I., and Devadas, S. (2017b). Secure processors part ii: Intel sgx security analysis and mit sanctum architecture. *Foundations and Trends*® *in Electronic Design Automation*, 11(3):249–361.
- Gotzfried, J., Eckert, M., Schinzel, S., and Muller, T. (2017). Cache Attacks on Intel SGX. In *Proceedings of the 10th European Workshop on Systems Security*, EuroSec'17, pages 2:1–2:6, New York, NY, USA. ACM.
- Gueron, S. (2016). Memory encryption for general-purpose processors. *IEEE Security & Privacy*, 14(6):54–62.
- InfoWatch (2017). Global data leakage report h1 2017. https://infowatch.com/ report2017_half.

- Jain, P., Desai, S. J., Shih, M.-W., Kim, T., Kim, S. M., Lee, J.-H., Choi, C., Shin, Y., Kang, B. B., and Han, D. (2016). OpenSGX: An open platform for sgx research. In USENIX NDSS.
- Karande, V., Bauman, E., Lin, Z., and Khan, L. (2017). SGX-Log: Securing System Logs With SGX. In *Proceedings of the 2017 ACM on Asia Conference on Computer and Communications Security*, ASIA CCS '17, pages 19–30, New York, NY, USA. ACM.
- Koeberl, P., Schulz, S., Sadeghi, A.-R., and Varadharajan, V. (2014). Trustlite: A security architecture for tiny embedded devices. In *Proceedings of the Ninth European Conference on Computer Systems*, EuroSys '14, pages 10:1–10:14, New York, NY, USA. ACM.
- Kreutz, D. (2013). Designing dependable control platforms for software defined networks. In 32nd IEEE Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS 2013). http://arxiv.kreutz.xyz/srds2013_dependable_SDNs.pdf.
- Kreutz, D., Ramos, F., and Verissimo, P. (2014). Anchors of trust for autonomic and secure configuration and assessment in SDN. In *44th Annual IEEE/IFIP DSN*. http://arxiv.kreutz.xyz/dsn2014_anchors_of_trust.pdf.
- Kreutz, D., Ramos, F. M., and Verissimo, P. (2013). Towards secure and dependable software-defined networks. In *ACM SIGCOMM HotSDN*, pages 55–60, New York, NY, USA. ACM.
- Kreutz, D., Ramos, F. M. V., Veríssimo, P. E., Rothenberg, C. E., Azodolmolky, S., and Uhlig, S. (2015). Software-defined networking: A comprehensive survey. *Proceedings of the IEEE*, 103(1):14–76.
- Kreutz, D., Yu, J., Esteves-Verissimo, P., Magalhaes, C., and Ramos, F. M. V. (2017a). The KISS principle in Software-Defined Networking: An architecture for Keeping It Simple and Secure. *ArXiv e-prints*.
- Kreutz, D., Yu, J., Ramos, F. M. V., and Esteves-Verissimo, P. (2017b). ANCHOR: logically-centralized security for Software-Defined Networks. *ArXiv e-prints*.
- Kreutz, D., Yu, J., Ramos, F. M. V., and Esteves-Verissimo, P. (2018a). ANCHOR: logically-centralized security for Software-Defined Networks. *ACM Transactions on Privacy and Security (TOPS)*. Under minor review. Expected publication by 2019.
- Kreutz, D., Yu, J., Ramos, F. M. V., and Esteves-Verissimo, P. (2018b). The KISS principle in Software-Defined Networking: a framework for secure communications. *IEEE Security & Privacy*. Accepted. Publication expected by the end of October 2018.
- Masera, R., Bisso, R., and Kreutz, D. (2018). Diffie-Hellman (DH), PRF e KDF: Uma alternativa para inicializar iDVVs. Aceito no SIEPE 2018. Disponível em: http://arxiv.kreutz.xyz/siepe2018_idvv_dh.pdf.
- Samociuk, D. (2015). Secure communication between openflow switches and controllers. *AFIN 2015*, 39.
- Schwarz, M., Weiser, S., Gruss, D., Maurice, C., and Mangard, S. (2017). Malware guard extension: Using sgx to conceal cache attacks. In *International Conference on Detection of Intrusions and Malware, and Vulnerability Assessment*, pages 3–24. Springer.

- Scott-Hayward, S., Natarajan, S., and Sezer, S. (2016). A survey of security in software defined networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1):623–654.
- Shinde, S., Le Tien, D., Tople, S., and Saxena, P. (2017). Panoply: Low-TCB Linux Applications With SGX Enclaves. In *NDSS*.
- Van Bulck, J., Minkin, M., Weisse, O., Genkin, D., Kasikci, B., Piessens, F., Silberstein, M., Wenisch, T. F., Yarom, Y., and Strackx, R. (2018). Foreshadow: Extracting the keys to the intel sgx kingdom with transient out-of-order execution. In *Proceedings of the 27th USENIX Security Symposium. USENIX Association*.