

HAMILTON FONTE II

**DIZANG: UMA SOLUÇÃO PARA COLETA DE
EVIDÊNCIAS FORENSES PARA ATAQUES DE
INJEÇÃO NA NUVEM**

Documento apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a realiza-
ção do Exame de Qualificação de Mestrado
em Engenharia Elétrica.

São Paulo
2018

HAMILTON FONTE II

**DIZANG: UMA SOLUÇÃO PARA COLETA DE
EVIDÊNCIAS FORENSES PARA ATAQUES DE
INJEÇÃO NA NUVEM**

Documento apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a realiza-
ção do Exame de Qualificação de Mestrado
em Engenharia Elétrica.

Área de concentração:
Engenharia da Computação

Orientador:
Marcos Antonio Simplicio Junior

São Paulo
2018

RESUMO

A adoção de arquiteturas em nuvem aumenta a cada dia, e proporcionalmente aumenta também o número de casos em que esse tipo de tecnologia é usada para fins ilícitos. Infelizmente, devido à natureza volátil da nuvem, a tarefa de coletar evidências para análise forense nesse ambiente tem esbarrado em desafios práticos e legais. Mais precisamente, a prática herdada da forense tradicional para coleta de evidências, por meio da qual se isola a cena do crime e coletam-se todas as evidências, foi traduzida para a forense digital como a cópia bit a bit da mídia que se deseja investigar. Tal prática leva à coleta de grandes volumes de informação para análise, impactando negativamente o tempo de investigação. Além disso, duas características das soluções em nuvem dificultam a obtenção de evidências válidas. A primeira é que o compartilhamento de recursos físicos entre vários usuários impede a sua remoção para análise, uma vez que isso violaria a privacidade de indivíduos não envolvidos na investigação. A segunda é que a localização do recurso físico em uma região geográfica diferente daquela onde o crime foi cometido pode impedir a coleta de evidências caso não haja acordos de cooperação estabelecidos. Estes aspectos, se não forem levados em consideração, podem colocar em xeque a credibilidade das evidências. Este trabalho analisa propostas na literatura voltadas a resolver tais desafios na coleta evidências na nuvem, discutindo suas limitações. Propõe-se então uma solução que cobre coleta, transporte e armazenamento da evidência, visando suplantiar as limitações existentes no estado da arte. A solução proposta, denominada Dizang, provê uma forma de correlacionar evidências e sua origem virtual, permitindo transportar e armazenar tais dados sem afetar sua credibilidade. Para tal, é feito o uso de contêineres e seus respectivos identificadores, técnica esta que tem a vantagem de conseguir preservar a relação evidência-origem mesmo que esta última não exista mais na solução sob investigação. Em resumo, Dizang tem como focos (1) a reprodutibilidade do processo de coleta, (2) o estabelecimento de um vínculo entre a evidência coletada e sua origem, (3) a preservação da jurisdição e da privacidade de usuários não envolvidos na investigação e (4) a garantia de custódia da evidência.

ABSTRACT

MARCOS: Reescreva considerando as revisões na parte em português - Hamilton: Feito The adoption of cloud architectures increases every day, and with it increases the number of cases in which this type of technology is used for illicit purposes. Unfortunately, due to the volatile nature of the cloud, the task of collecting evidences for forensic analysis in this environment has run into practical and legal challenges. The practice inherited from the traditional forensics, through which the crime scene is isolated and all the evidence is collected, when applied to digital forensics, led to the collection of large volumes of information for analysis. Such practice had a negative impact on the time of investigation. In addition, two characteristics of cloud solutions make it difficult to obtain valid evidence. The first is that the physical resources are shared among multiple users which prevents their removal for analysis, as this would violate the privacy of individuals not involved in the investigation. The second is the resource's physical location which can be in a different geographical region where the crime was committed and may prevent the collection of evidence if there are no cooperation agreements in place. These aspects, if not taken into consideration may call into question the credibility of the evidence. This work analyzes proposals in the literature aimed at solving such challenges, discussing its limitations and proposes a solution that covers collection, transportation and storage of evidence, aiming at overcoming existing limitations in the state of art. The proposed solution, called Dizang, provides a way of correlating evidence and its virtual origin, allowing the transport and storage of such data without affecting its credibility. For this, containers are used for their ability to preserve the relationship evidence-source even though the latter does not exist in the system under investigation. In summary, Dizang focuses on (1) the reproducibility of the collection process, (2) the establishment of a link between the evidence collected and its origin, (3) the preservation of jurisdiction and privacy of users not involved in the investigation and (4) the evidence's chain of custody.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Modelo Automático de Aquisição de Dados Forenses	23
2	Virtuoso	25
3	<i>A Log Based Approach Model</i>	26
4	<i>Backup Approach Model</i>	27
5	<i>FoRensic Open Stack Tools</i>	28
6	<i>Digital Forensic Framework for Cloud Environment</i>	30
7	<i>Digital Forensic as a Service - Indexed Data</i>	31
8	Janela deslizante de coleta de evidência	37
9	Arquitetura geral da solução Dizang	38
10	Evolução do uso do espaço em disco com o Dizang	40
11	Tempo de cópia da memória de um contêiner	41
12	Cronograma de projeto.	44

LISTA DE TABELAS

1	Comparativo de soluções de coleta de informações de memória de máquinas em nuvem para análise forense	34
---	---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VM	<i>Virtual Machines</i>
SO	Sistema Operacional
SaaS	<i>Software as a Service</i>
PaaS	<i>Platform as a Service</i>
IaaS	<i>Infrastructure as a Service</i>
FaaS	<i>Forensics as a Serviço</i>
LXC	<i>Linux Containers</i>
VMI	<i>Virtual Machine Introspection</i>
VMM	<i>Virtual Machine Manager</i>
CSP	<i>Cloud Service Provider</i>
GRR	<i>Google Rapid Response</i>
FROST	<i>FoRensic Open Stack Tools</i>
API	<i>Aplication Programing Interface</i>
SWGDE	<i>Scientific Working Group on Digital Evidence</i>
ETL	<i>Extract, Transform and Load</i>
EDIPM	<i>Enhanced Digital Investigation Process Model</i>
SENASP	Secretaria Nacional de Segurança Pública
ETL	<i>Extract, Transform and Load</i>

SUMÁRIO

1	Introdução	8
1.1	Motivação	9
1.2	Objetivos	10
1.3	Justificativa	10
1.4	Organização do documento	11
2	Fundamentação Teórica	12
2.1	Nuvens computacionais e contêineres	12
2.2	Forense digital e seus desafios	15
2.2.1	Aceitabilidade da evidência em processo legal.	15
2.2.2	Volume de dados para coleta	17
2.2.3	Privacidade e jurisdição	18
2.2.4	Coleta de evidências de memória volátil de máquinas em nuvem	18
3	Revisão da literatura	21
3.1	Soluções para análise forense em nuvem	21
3.1.1	Modelo automático de aquisição de dados para fins forenses .	21
3.1.2	Introspecção em máquina virtual	22
3.1.3	Virtuoso	24
3.1.4	Abordagem baseada em logs	25

3.1.5	Abordagem baseada em backups	26
3.1.6	Arcabouço forense para OpenStack	27
3.1.7	Forense como serviço	29
3.1.8	Abordagem de indexação de dados coletados para fins forenses	29
3.2	Aspectos relacionados a coleta de evidência	30
3.2.1	Acessar e coletar as informações de memória das máquinas virtuais em nuvem	31
3.2.2	Capacidade de reproduzir o processo e obter os mesmos resul- tados	32
3.2.3	Não violar privacidade ou jurisdição das partes não envolvidas na investigação	33
3.2.4	Garantir a cadeia de custódia da evidência	33
3.3	Resumo	34
4	Proposta de projeto: Dizang	35
4.1	Descrição	35
4.2	Implementação	38
4.3	Resultados experimentais preliminares	39
4.4	Limitações	41
5	Conclusão	42
5.1	Cronograma esperado para os próximos passos	43
	Referências	45

1 INTRODUÇÃO

Técnicas de virtualização, replicação de serviços e compartilhamento de recursos entre múltiplos usuários (multi-inquilinato) proveem a nuvens computacionais uma elevada escalabilidade (MORSY; GRUNDY; MULLER, 2010). Ao mesmo tempo, tais mecanismos também criam grande volatilidade dos recursos virtuais que executam aplicações em nuvem. Afinal, quando submetida a uma carga elevada, uma aplicação hospedada na nuvem pode criar clones das máquinas virtuais que a hospedam e balancear a carga entre elas. Isso permite ao sistema em nuvem atender à demanda dos usuários da aplicação sem prejuízos na qualidade do serviço oferecido. Após esse pico, as máquinas que foram clonadas são normalmente desativadas, seus recursos liberados e o sistema retorna à capacidade anterior, evitando-se desperdício de recursos.

Embora interessante do ponto de vista de eficiência e custos, do ponto de vista forense a volatilidade da nuvem traz problemas em caso de ataques. Por exemplo, pode-se supor um cenário em que uma das instâncias de processamento virtuais criadas temporariamente seja alvo de ameaças que atuam diretamente na sua memória, sem deixar rastros em discos (e.g., em arquivos de *log*). Nesse caso, as evidências desse evento podem ser completamente perdidas após as instâncias em questão serem desativadas e terem seus recursos liberados. Essa dificuldade é ainda agravada por aspectos como multi-inquilinato e multi-jurisdição, típicas de soluções em nuvem pública ou híbrida (GILBERT; SUJEET, 2008). Especificamente, o multi-inquilinato dificulta a obtenção do *hardware* que executa as aplicações de interesse. Afinal, como ele é compartilhado por vários usuários, removê-los para análise poderia levar a uma violação de

privacidade dos usuários não relacionados à investigação. Já a natureza distribuída da nuvem pode levar à alocação de informações relevantes em vários países, dificultando a sua obtenção, em especial quando não existem acordos de cooperação entre as entidades envolvidas (DYKSTRA; SHERMAN, 2012). Combinadas, tais características limitam a coleta de evidências com a credibilidade necessária para que elas possam ser usadas em processos legais, que exigem o respeito à privacidade, à jurisdição e à cadeia de custódia, bem como a reprodutibilidade do processo de coleta (RAHMAN; KHAN, 2015).

1.1 Motivação

Embora existam soluções na literatura que abordam a coleta de informações de nuvem com o propósito de análise forense, a grande maioria delas aborda a coleta, o transporte e o armazenamento de forma isolada. Por exemplo, trabalhos como (DYKSTRA; SHERMAN, 2013) e (REICHERT; RICHARDS; YOSHIGOE, 2015) tratam de fatores como multi-inquilinato e multi-jurisdição, discutindo formas de coleta e preservação da evidência fora da nuvem. Já estudos como (GEORGE; VENTER; THOMAS, 2012) se concentram na análise forense para a coleta de evidência de máquinas virtuais em tempo de execução, enquanto trabalhos como (SANG, 2013) abordam processos de garantia da cadeia de custódia em ambientes de nuvem para transporte da evidência. Por outro lado, não foram identificadas na literatura propostas que (1) descrevam como o dado é coletado e armazenado observando a cadeia de custódia, e (2) visem garantir que, mesmo que um recurso virtualizado (e.g., uma máquina virtual) seja desalocado, haja condições de se reproduzir o processo de coleta de evidências.

1.2 Objetivos

O presente trabalho visa suplantiar as limitações identificadas na literatura com relação à capacidade de coleta de evidências de aplicações em nuvem. Mais precisamente, por meio de uma proposta que tem como focos (1) a reprodutibilidade do processo de coleta, (2) o estabelecimento de um vínculo entre a evidência coletada e sua origem, (3) a preservação da jurisdição e da privacidade dos não envolvidos na investigação e (4) a garantia de custódia da evidência. Desta forma, a solução buscada deve prover uma forma de obter dados relevantes para investigações ao mesmo tempo que permita transportar e armazenar tais dados preservando sua credibilidade. Para isso, a proposta supõe que o sistema sendo monitorado é executado dentro de um ambiente virtualizado em nuvem, tendo como foco a tecnologia de contêineres.

1.3 Justificativa

O crescente volume de informações que as soluções em nuvem armazenam e trafegam atualmente, bem como os aspectos de multi-inquilinato e a multi-jurisdição dos provedores de nuvem, estão entre os principais obstáculos enfrentados pelos investigadores forenses. (QUICK; CHOO, 2014) (GILBERT; SUJEET, 2008). Desta forma, a criação de soluções que permitam melhorar o processo de investigação forense nesse cenário tem relevância não apenas teórica, mas também prática.

Ao mesmo tempo, virtualização tem sido amplamente adotada por empresas das mais diversas áreas. Segundo o "State of the Cloud Report", relatório produzido pela empresa Right Scale (Right Scale, 2017), 95% das organizações entrevistadas estão utilizando ou experimentando soluções em nuvem no modelo IaaS (*Infrastructure as a Service* – Infraestrutura como um Serviço). Embora a virtualização de recursos na nuvem seja tradicionalmente feita por meio de máquinas virtuais, tem ganhado importância também a tecnologia de contêineres (BERNSTEIN, 2014), uma forma de

virtualização bastante leve e flexível. De fato, conforme o “Container Market Adoption Survey 2016”, realizado com 235 empresas que têm desenvolvimento de software como sua atividade fim ou como suporte à atividade fim, 76% dos respondentes utilizam contêineres para melhorar a eficiência do processo de desenvolvimento e em suas arquiteturas de microsserviços em nuvem. Essa tendência motiva a construção de soluções que levem em consideração as particularidades inerentes a contêineres computacionais, e que sejam capazes de tirar vantagem de suas características.

1.4 Organização do documento

O restante deste documento está organizado conforme os seguintes capítulos.

O Capítulo 2 apresenta o ambiente em que este trabalho está inserido, as tecnologias envolvidas e os desafios a serem superados.

O Capítulo 3 analisa os trabalhos relacionados a forense de memória em nuvem.

O Capítulo 4 apresenta as atividades realizadas até o presente momento como parte do trabalho de pesquisa aqui apresentado, bem como os próximos passos esperados para a sua conclusão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Desde 2001, diversos modelos para a condução de investigação digital foram propostos. O *Enhanced Digital Investigation Process Model*, proposto por Carrier e Stafford em 2003, é a última iteração na evolução do processo forense digital (GRISPOS; STORER; GLISSON, 2012). Entretanto, como tais modelos de investigação foram desenvolvidos antes da aparição de tecnologias de computação em nuvem, muitos partem do pressuposto que o investigador tem acesso e controle sobre o sistema sob investigação (GRISPOS; STORER; GLISSON, 2012). Esta defasagem é um dos desafios da forense digital atual.

Neste capítulo, são discutidos os principais conceitos que permeiam esse cenário. Especificamente, após uma discussão geral sobre computação em nuvem e suas particularidades, incluindo o uso de contêineres, são discutidas as características esperadas de um processo de forense digital robusto.

2.1 Nuvens computacionais e contêineres

Uma nuvem computacional é um modelo de infraestrutura no qual recursos compartilhados em quantidade configurável, acessíveis via rede, são alocados e desalocados com esforço mínimo de gerenciamento por parte de um provedor de serviços. Existem basicamente três modelos principais de comercialização de uso da nuvem (MELL; GRANCE, 2011):

- SaaS (*Software as a Service* – *Software* como serviço): Onde se provê o *software* que será utilizado; nesse caso, os clientes do serviço são os usuários finais o software.
- PaaS (*Platform as a Service* – Plataforma como serviço): Onde se provê o ambiente para o desenvolvimento, teste e execução do *software*; nesse caso, os clientes do serviço são desenvolvedores de aplicações.
- IaaS (*Infrastructure as a Service* – Infraestrutura como serviço): Onde são fornecidos recursos computacionais básicos, como processamento, memória e redes, em geral de forma virtualizada; os clientes desse tipo de serviço costumam ser arquitetos de sistemas.

O tipo de serviço de nuvem mais pertinente para este trabalho é o IaaS, uma solução muito usada atualmente pela sua capacidade de prover recursos sob demanda de forma auto-escalável. Nesse cenário, o uso intenso de tecnologias de virtualização costuma levar a recursos altamente voláteis, que são alocados e desalocados a qualquer momento pelo orquestrador da nuvem para suprir eventuais aumentos e reduções de demanda. É possível até mesmo construir scripts para automatizar a construção da arquitetura desejada, permitindo a instanciação e interconexão de máquinas adequadas para a atividade fim do sistema. Esses scripts, escritos em linguagem específica como Puppet (Puppet,), Chef (Chef,) ou Vagrant (Vagrant,), podem conter instruções de como distribuir o tráfego de rede entre as diferentes instâncias de computação ou armazenamento. Dentre as vantagens de sua utilização, podem ser citadas a capacidade de usar os recursos de nuvem de uma forma mais eficiente, levar a uma menor necessidade de intervenção humana, e prover maior resiliência a variações de demanda do sistema.

Uma tecnologia de virtualização possível para cenários de nuvem, e cuja utilização vem crescendo nos últimos anos, são os chamados contêineres (BERNSTEIN, 2014).

Basicamente, um contêiner é um método de virtualização do sistema operacional que permite executar uma aplicação, bem como suas dependências, em um processo no qual recursos como disco, memória e rede permanecem isolados. Diferente das máquinas virtuais, a virtualização com contêineres é feita no nível do Sistema Operacional (SO) nativo. Como resultado, tem-se uma implementação de virtualização na qual eliminam-se camadas entre o aplicativo executado e o *hardware* físico, permitindo maior granularidade no controle sobre esses recursos e melhorando a eficiência da infraestrutura.

Uma implementação bastante utilizada para esse propósito são os LXC (*Linux Containers* – Contêineres Linux) (LINUXCONTAINERS.ORG, 2015), que aproveitam-se de funcionalidades como *cgroups*, *kernel namespaces* e *chroot* do kernel do Linux para auxiliar no gerenciamento e isolamento de recursos virtuais. Mais precisamente, a funcionalidade de *cgroups* (*Control Groups* – Grupos de Controle) presente no Kernel do Linux limita e isola o uso de recursos como CPU, memória e disco de um conjunto de processos, além de organizá-los de forma hierárquica. O trabalho nessa funcionalidade começou em 2006 na Google, sob a denominação de *process container*. No final de 2007, seu nome foi alterado para *control groups*, e o resultado foi então adicionado à versão 2.6.24 do kernel lançado em 2008 (Unix Man Pages, a).

Já o *Namespacing* é uma funcionalidade do Kernel do Linux usada para isolar e virtualizar recursos do sistema operacional, como identificadores de processos, acessos à rede, comunicação inter-processos e sistema de arquivos. *Namespacing* envolve os recursos do sistema operacional em uma abstração que faz parecer aos processos de um mesmo *namespace* que eles tem sua própria instância isolada de um recurso global. Desta forma, essa é a principal funcionalidade por trás da implementação de Contêineres Linux (Unix Man Pages, d).

Finalmente, *chroot* (*Change Root* – Mude Root) é uma funcionalidade do Kernel do Linux usada para mudar o diretório *root* enxergado pelo processo que está chamando a função, bem como por todos os seus processos filhos. A chamada a *chroot* altera o processo de resolução de caminhos do sistema operacional para o processo que o chamou (Unix Man Pages, b). Desta forma, pode-se instalar uma distribuição Linux secundária em uma pasta, ao invés de uma partição, e executar programas desta pasta sem perda significativa de desempenho.

2.2 Forense digital e seus desafios

A área de forense digital (também conhecida por forense computacional) refere-se a um conjunto de técnicas de coleta e análise da interação entre humanos e computadores de forma que esta seja aceita em um processo legal. Tal como a forense tradicional, a forense digital se baseia no princípio de Locard, estabelecido pelo médico francês Edmond Locard da seguinte forma: “Quando um indivíduo entra em contato com outro objeto ou indivíduo, este sempre deixa vestígio deste contato” (RAMOS, 2011). De forma similar, a forense digital tem por objetivo a investigação de evidências digitais da interação entre homem e máquina, de modo a reconstruir a cadeia de eventos passados para que suas conclusões sejam validadas por terceiros e sejam aceitas em um processo legal.

A seguir são detalhados os principais desafios enfrentados pela forense digital quando aplicada a infraestruturas em nuvem.

2.2.1 Aceitabilidade da evidência em processo legal.

O processo de análise forense no evento de um crime digital é descrito no EDIPM (*Enhanced Digital Investigation Process Model* – Modelo Melhorado para Processo de Investigação Digital) na forma de 4 fases (GRISPOS; STORER; GLISSON, 2012):

identificar, preservar, examinar e apresentar. A fase mais pertinente a este trabalho é a de preservação da evidência, que deve ser conduzida de forma forensicamente aceitável. Ou seja, deve-se coletar as evidências de forma que elas sejam aceitas em um processo legal e não sejam invalidadas no curso do mesmo.

Para atingir tal objetivo, o primeiro passo é a garantia da cadeia de custódia relacionada a evidência. Cadeia de custódia é o processo de documentação da história cronológica da evidência de modo a saber onde a evidência esteve e quem teve acesso a ela (RAMOS, 2011). Uma cadeia de custódia idealmente deve tornar visível o estado da evidência antes, durante e após a interação com o processo de investigação (LUIS; SANCHEZ; GIOVA, 2016). A razão para essa preocupação é que alguns processos investigativos podem causar alteração da evidência na forma que foi coletada, como, por exemplo, a consolidação em um único local dos arquivos que compõem uma base de dados distribuída.

O passo seguinte é a garantia da autenticidade e da integridade da evidência. Autenticidade pode ser definida como “o processo pelo qual se pode garantir a autoria do documento eletrônico” (RAMOS, 2011), ou seja, por meio do qual se não permite dúvida quanto à identificação do autor. Já a integridade pode ser definida como “o atestado da inteireza do documento eletrônico após sua transmissão, bem como apontar eventual alteração irregular de seu conteúdo” (RAMOS, 2011). Caso haja dúvida acerca de um desses requisitos, uma perícia técnica pode ser convocada. Nesse caso, durante a perícia é analisado o autor da evidência, ou seja, verifica-se sua fonte e se a mesma não foi alterada no processo.

Em uma infraestrutura física, a coleta de evidências pode ser feita de forma relativamente simples, bastando-se remover o recurso físico, transportar este para um laboratório e lá analisar os dados. Para limitar a exposição da evidência a manipulações indevidas, ela pode ser mantida em uma sala-cofre, à qual o acesso é controlado. A reprodutibilidade do processo de coleta e a manutenção da integridade da evidência

são, então, tarefas bem diretas.

Já em um cenário de computação em nuvem, especialmente as de infraestrutura auto-escalável, existe um conjunto de novos desafios. Primeiramente, em contraste com infraestruturas tradicionais, o recurso físico em princípio não pode ser removido: como os recursos são utilizados por outros usuários não relacionados à investigação, fazê-lo constituiria violação de privacidade. A volatilidade dos recursos também torna a verificação do seu autor um processo mais complexo, pois o recurso que gera certa evidência pode deixar de existir algum tempo depois de fazê-lo (SIMOU et al., 2014). A integridade da evidência também acaba sendo uma tarefa não trivial, pois ela precisa ser coletada, transportada e armazenada, o que caracteriza a necessidade de preservação da cadeia de custódia. Infelizmente, a violação de qualquer uma dessas características pode colocar em dúvida a credibilidade da evidência.

2.2.2 Volume de dados para coleta

O processo de coleta de evidências na forense digital herda suas práticas da forense tradicional, na qual isola-se cena do crime e coletam-se as evidências presentes. Transportando esse método para a forense digital, introduz-se a realização da cópia bit a bit da informação que se deseja analisar. No passado, com as soluções manipulando quantidades bem menores de memória, disco e tráfego, tal prática não era considerada muito problemática. Entretanto, nas atuais soluções, aplicações e arquiteturas em nuvem, o volume de dados é consideravelmente maior (QUICK; CHOO, 2014). Afinal, o acesso fácil e dinâmico a recursos de armazenamento e de processamento, como máquinas virtuais, balanceadores de carga e *firewalls*, acaba também aumentando a quantidade elementos geradores de evidência. Esse problema é ilustrado em (QUICK; CHOO, 2014), onde se discute uma investigação na qual a quantidade de dados a serem analisados para fins de forense digital tomaria 6 meses.

Encontrar uma forma de armazenar menos informações e, assim, tornar a fase de

análise mais rápida e eficiente, é um passo importante para garantir a celeridade de investigações forenses.

2.2.3 Privacidade e jurisdição

MARCOS: Eu acho que já li essa frase... (sim, está repetitivo... resuma em uma frase curta, potencialmente fazendo referência à seção anterior) - **Hamilton:** Assim? A prática de remoção de equipamentos para coleta de evidências, mencionada na seção 2.2.2, também traz consequências negativas do ponto de vista de privacidade. Mais precisamente, em soluções envolvendo infraestruturas físicas, tal prática não costuma trazer grandes problemas porque os objetos ou indivíduos sob investigação normalmente estão diretamente relacionados ao equipamento removido. Nas soluções em nuvem, entretanto, tal prática não é recomendada porque o recurso físico é compartilhado por vários usuários, inclusive indivíduos não envolvidos na investigação. Logo, remover tais recursos configuraria violação de privacidade. Como um complicador adicional, o fato de os dados potencialmente não estarem armazenados no mesmo território em que a investigação é realizada acaba demandando acordos de cooperação jurídica entre as partes, o que nem sempre é possível (SIMOU et al., 2014).

Neste cenário, encontrar uma forma de coletar a evidência sem violar jurisdição e privacidade ganham importância.

2.2.4 Coleta de evidências de memória volátil de máquinas em nuvem

A prática de armazenar histórico de tráfego de rede e alterações de dados armazenados em disco já é bem difundida na comunidade forense. Por outro lado, a memória volátil de computadores não costuma receber o mesmo tratamento: suas alterações quase nunca são armazenadas, seja por questões de desempenho ou por simples pra-

ticidade, dado a reduzida sobrevida dessas informações. Infelizmente, isso acaba dificultando a análise de uma classe específica de ataques, conhecidos como injeção de código em memória (CASE et al., 2014). Assim, quando usados contra uma arquitetura em nuvem, tais ataques não deixam rastros quando recursos de processamento virtuais são desativados e sua memória é liberada (VöMEL; STÜTTGEN, 2013; CASE et al., 2014). Em particular, têm especial interesse quatro tipos particulares dessa família de ameaças (CASE et al., 2014):

- **Injeção remota de bibliotecas:** Um processo malicioso força o processo alvo a carregar uma biblioteca em seu espaço de memória. Como resultado, o código da biblioteca carregada executa com os mesmos privilégios do executável em que ela foi injetada. Tal estratégia, comumente usada para instalar malwares, pode fazer com que uma biblioteca maliciosa armazenada no sistema seja distribuída por vários processos de uma mesma máquina, dificultando sua remoção (MILLER; TURKULAINEN, 2004).
- **Inline Hooking:** Um processo malicioso escreve código como uma sequência de bytes diretamente no espaço de memória de um processo alvo, e então força este último a executar o código injetado. O código pode ser, por exemplo, um *script de shell*.
- **Injeção reflexiva de biblioteca:** Um processo malicioso acessa diretamente a memória do processo alvo, inserindo nela o código de uma biblioteca na forma de uma sequência de bytes, e então força o processo a executar essa biblioteca. Nessa forma de ataque, a biblioteca maliciosa não existe fisicamente; isso torna tal estratégia de injeção de código potencialmente mais atrativa, pois o carregamento da biblioteca não é registrado no sistema operacional (SO), dificultando a detecção do ataque (FEWER, 2008).
- **Injeção de processo vazio:** Um processo malicioso dispara uma instância de um

processo legítimo no estado “suspense”; a área do executável é então liberada e realocada com código malicioso.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Os principais aspectos relacionados ao tratamento de evidências para análise forense em nuvem são: coleta, transporte, armazenamento, garantia da cadeia de custódia e reprodutibilidade do processo de coleta. Este capítulo descreve o estado da arte e discute como a presente proposta se insere nesse contexto.

3.1 Soluções para análise forense em nuvem

MARCOS: Do jeito que você está apresentando as figuras, você pode ser criticado pelo fato delas terem sempre muito mais informação do que você discute no texto. Não é crítico, mas talvez (se quiser se precaver de críticas) você queira repensar a forma como você discute a solução, para cobrir de forma mais ampla as caixas mostradas na figura (não precisa ser todas as caixinhas, mas pelo menos algumas é bom o leitor saber pra que servem... aí é analisar uma a uma o que potencialmente poderia ser melhor descrito.

Nesta seção são descritas algumas das principais propostas existentes para coleta de evidências forenses, fornecendo uma visão geral do estado da arte na área.

3.1.1 Modelo automático de aquisição de dados para fins forenses

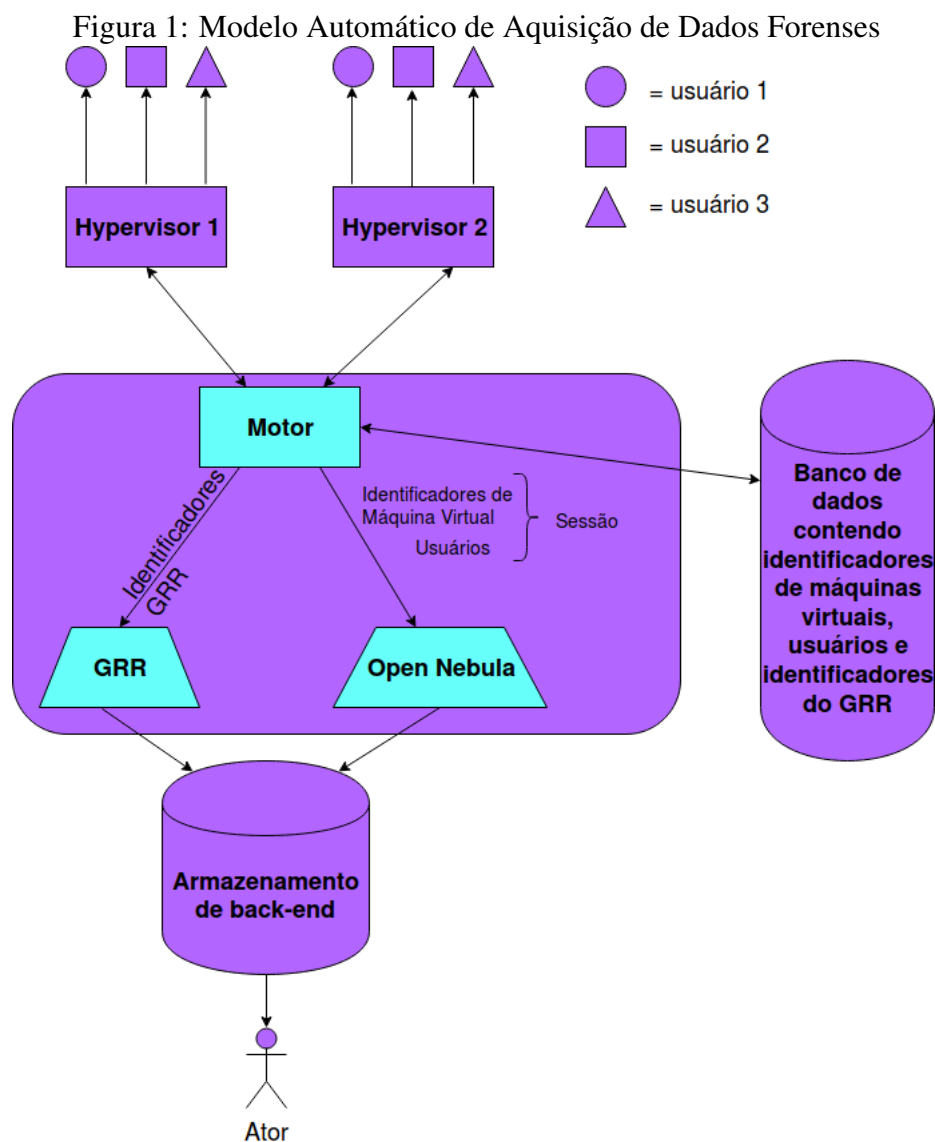
MARCOS: é sempre “a Figura X” (maiúsculo, porque é nome próprio), e “essa figura” (minúscula, porque não é nome próprio” - Hamilton : Feito

O modelo proposto por (REICHERT; RICHARDS; YOSHIGOE, 2015), ilustrado na Figura 1, é um processo de coleta de evidências integrado ao *hypervisor* e disparado por algum sistema de detecção de intrusão. A partir do momento em que uma ameaça é detectada, o modelo dita que sejam criados instantâneos (*snapshots*) das máquinas virtuais comprometidas. O intervalo de tempo em que os instantâneos de memória são gerados é configurável, e todos eles são armazenados em persistência. O modelo se preocupa em, de forma automatizada, excluir informações de clientes não relacionados à investigação e também em armazenar o restante em local seguro. O autor não descreve os detalhes do armazenamento, embora afirma que isso deve ser feito de forma “forensicamente aceitável”.

Para agregar e analisar as evidências coletadas, o modelo faz uso do GRR (*Google Rapid Response* – Resposta Rápida Google), uma ferramenta de resposta a incidentes criado no projeto 20% na Google para facilitar análises forenses de forma remota (e.g., acesso de baixo nível ao disco e à memória das máquinas analisadas) (GOOGLE, 2013). O tratamento de evidências usa um motor de regras baseado em um conjunto de descrições de ameaças conhecidas, as quais são armazenadas em um banco de dados. Caso alguma evidência coletada coincida com ameaças armazenadas, esse motor alerta um usuário humano para uma avaliação mais detalhada. Este modelo tem dentre suas principais vantagens a automação do processo de coleta, já que, ao menos em parte, ele dispensa intervenção humana.

3.1.2 Introspecção em máquina virtual

A proposta de (POISEL; MALZER; TJOA, 2013) é baseada na técnica de VMI (*Virtual Machine Introspection* – Introspecção em Máquina Virtual) para coleta de memória volátil. Essa técnica se apoia no fato de que o VMM (*Virtual Machine Manager* – Gerenciador de Máquinas Virtuais) mapeia os recursos alocados para máquinas virtuais nos recursos físicos correspondentes da máquina hospedeira. Este ma-



Adaptado de (REICHERT; RICHARDS; YOSHIGOE, 2015)

peamento é usado para permitir que a memória volátil copiada da máquina virtual seja reconstruída em uma máquina física, para análise posterior. A proposta realiza coleta contínua de instantâneos de memória durante o funcionamento do sistema, sem distinção do que aconteceu antes ou depois do fato de interesse, e todos os instantâneos de memória são armazenados para análise. Visando eliminar a chance de inconsistências no instantâneo de memória volátil, a máquina virtual tem sua execução suspensa durante o processo de extração.

Uma desvantagem da técnica de VMI, mencionada pelo próprio autor **MAR-**

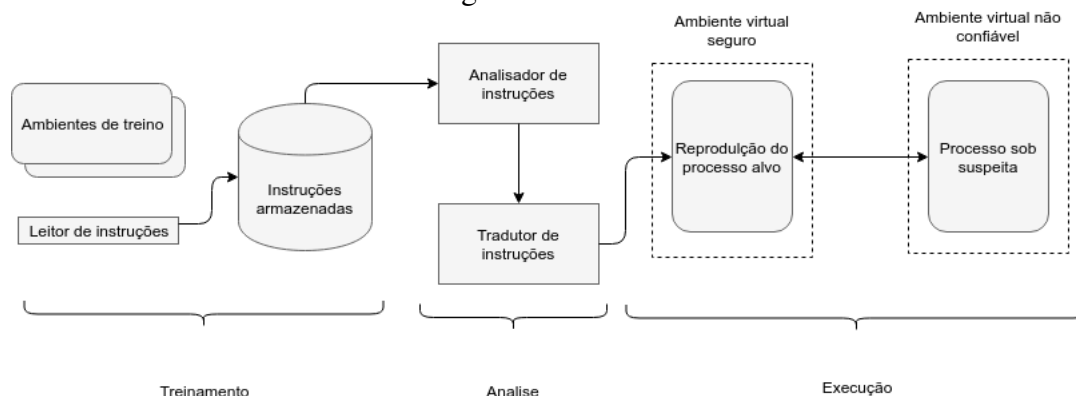
COS: (POISEL; MALZER; TJOA, 2013, Seção QUAL SECAO?) é a necessidade de tradução de endereços de memória da máquina virtual em endereços de memória da máquina física hospedeira. Como essa tradução depende de conhecimento do que está sendo executado na máquina virtual, uma solução baseada em VMI não é completamente portátil, sendo necessárias adequações para diferentes clientes. Além disso, o custo computacional dessa tradução é potencialmente elevado **MARCOS: É isso mesmo? Não ficou claro na frase original o que era “computacionalmente custoso”, então assumi aqui que é “a tradução”..**

3.1.3 Virtuoso

Também na vertente de introspecção de máquina virtual, (DOLAN-GAVITT et al., 2011) propõe o *Virtuoso*, um arcabouço de coleta de informações de processos específicos em uma máquina virtual. O arcabouço funciona em três fases. A primeira realiza um estudo em uma máquina virtual de testes, mapeando o conjunto de instruções executado pelo processo do qual se deseja coletar dados de memória. A segunda fase traduz o conjunto de instruções mapeados na fase anterior, e então cria um arquivo executável para que o processo seja reproduzido fora da máquina virtual. Para executar as instruções assim extraídas, a terceira fase usa um ambiente na máquina hospedeira capaz de acessar os endereços de memória da máquina virtual, tornando possível coletar instantâneos de memória do processo em execução. A Figura 2 ilustra o funcionamento desse arcabouço.

A principal vantagem do Virtuoso é a capacidade de coletar instantâneos de memória de um processo específico. Uma desvantagem importante, entretanto, é que sua atuação se dá apenas após o evento que se deseja avaliar forensicamente.

Figura 2: Virtuoso

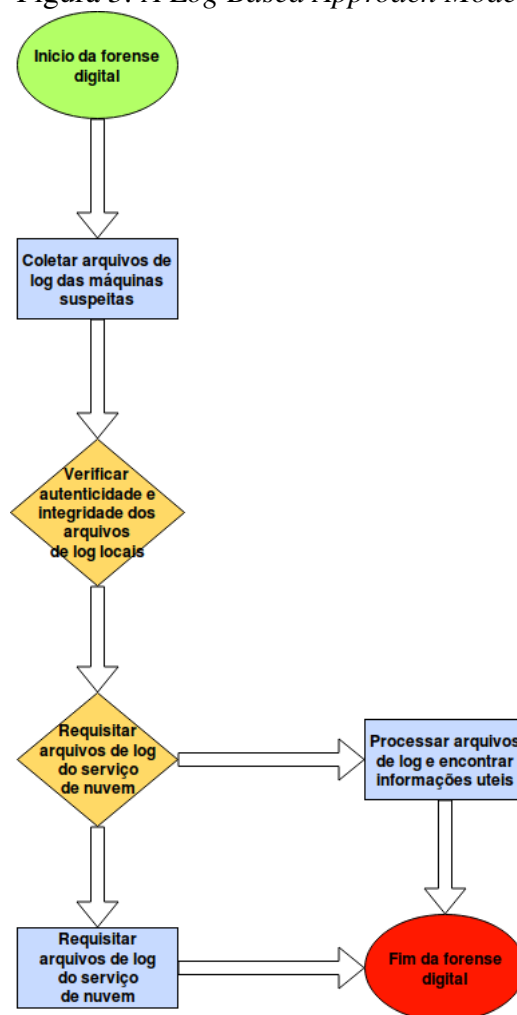


Adaptado de (DOLAN-GAVITT et al., 2011)

3.1.4 Abordagem baseada em logs

O arcabouço proposto por (SANG, 2013) é um sistema que funciona em parceria com o provedor de nuvem: o provedor último envia informações ao arcabouço, que por sua vez as armazena em um local adequado, de forma centralizada. O conjunto de informações armazenadas é negociado antecipadamente com o provedor de nuvem, indo desde instantâneos de memória volátil até pacotes trafegados nas interfaces de rede da máquina virtual. O arcabouço coleta informações continuamente e usa cálculo de hash das evidências enviadas pelo provedor de nuvem para garantir que elas não foram alteradas durante o transporte. A Figura 3 ilustra o funcionamento da solução, focando em um caso específico de log de rede, de modo similar ao descrito em (SANG, 2013).

Assim como as propostas anteriores, o arcabouço em questão também não faz distinção do que aconteceu antes ou depois do fato de interesse, mas coleta constantemente informações da máquina virtual. Outra potencial limitação é que o arcabouço depende da cooperação do provedor de nuvem. Tal dependência é uma estratégia considerada fraca pela comunidade forense, pois a prioridade do CSP (*Cloud Service Provider* – Provedor de Serviços de Nuvem) é a de garantir a disponibilidade do serviço, não de coletar evidências (ALQAHTANY et al., 2015).

Figura 3: *A Log Based Approach Model*

Adaptado de (SANG, 2013)

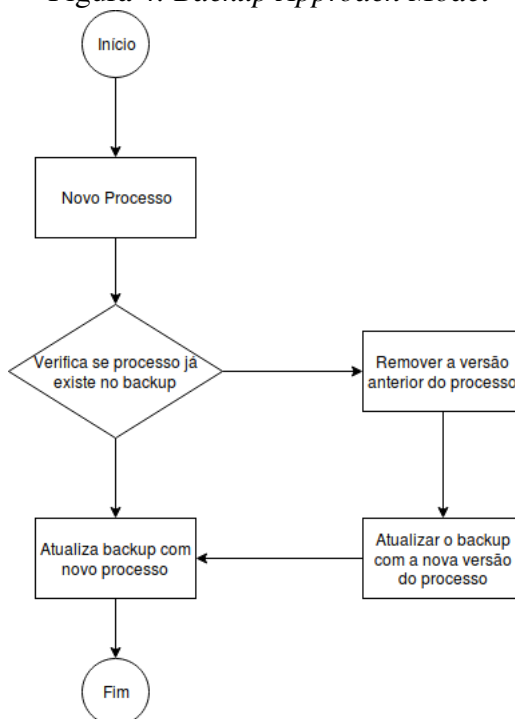
3.1.5 Abordagem baseada em backups

O trabalho descrito em (DEZFOULI et al., 2012) é voltado a dispositivos móveis e tem como principal característica a preocupação com as limitações de armazenamento do dispositivo. Por essa razão, o processo de coleta de instantâneos de memória volátil separa as informações e as armazena por processo ativo **MARCOS: O que seria “armazenar por processo ativo”? Eu nem sabia que dava para “armazenar por processo passivo”...**, de modo a permitir um gerenciamento adequado do espaço em disco ocupado pelas informações. A solução também se preocupa em descartar informações de processos que foram terminados e removidos da memória, além de buscar

u uso consciente do espaço de armazenamento disponível no dispositivo. A Figura 4 mostra, em alto nível, a forma como o armazenamento de evidências é gerenciado.

Como em diversas outras propostas, processo de coleta de informações de memória volátil em (DEZFOULI et al., 2012) é executado continuamente, independente de eventos de interesse (e.g., detecção de ameaças).

Figura 4: *Backup Approach Model*



Adaptado de (DEZFOULI et al., 2012)

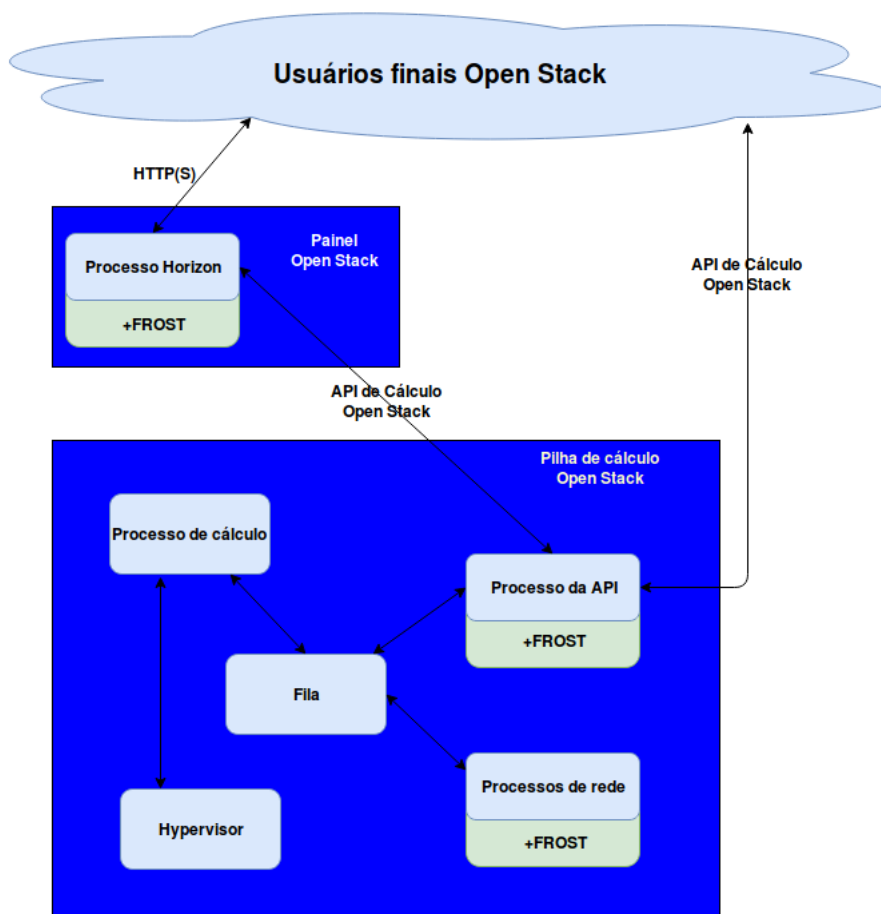
3.1.6 Arcabouço forense para OpenStack

A ferramenta FROST (*FoRensic Open Stack Tools* – Ferramentas Forenses para Arcabouço Open Stack), proposta por (DYKSTRA; SHERMAN, 2013), consiste em um conjunto de bibliotecas integradas ao OpenStack, um dos arcabouços de gerenciamento de infra estruturas virtualizadas bastante difundido (STACK, 2018). Por meio dessa integração, o FROST expõe um conjunto de APIs que podem ser usadas por aplicações de coleta de evidências forenses. Essas APIs dão acesso a recursos da máquina

virtual administrada, tais como disco, logs de tráfego de rede e memória volátil. A proposta descreve apenas o arcabouço, deixando a critério do usuário detalhes como periodicidade e tamanho da coleta, bem como a forma de transporte da evidência e onde ela é armazenada. A Figura 5 ilustra a integração entre FROST e OpenStack.

De todas as propostas avaliadas, a FROST é a única que mostra preocupação com adequação a questões legais e padrões já estabelecidos na indústria forense. Especificamente, o autor declara que FROST segue as práticas definidas no SWGDE (*Scientific Working Group on Digital Evidence* – Grupo de Pesquisa Científica Em Evidência Digital) e do Manual de Busca em Apreensão do Departamento de Justiça Norte-Americano.

Figura 5: *FoRensic Open Stack Tools*



Adaptado de (DYKSTRA; SHERMAN, 2013)

3.1.7 Forense como serviço

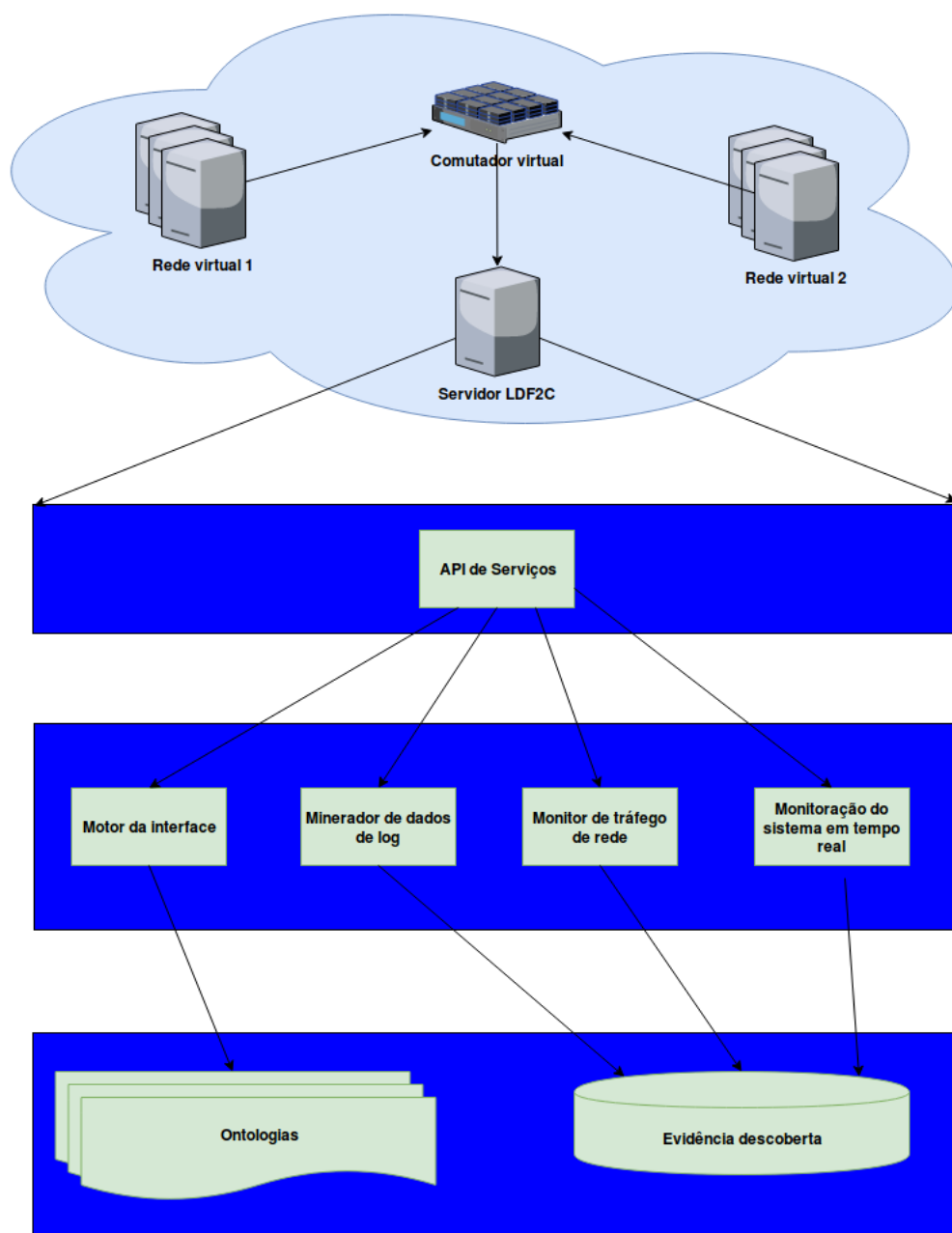
O trabalho descrito em (GEORGE; VENTER; THOMAS, 2012) se concentra em monitoramento de rede, operando em uma arquitetura FaaS (*Forense as a Service* – Forense Como Serviço). Conforme ilustrado na Figura 6, a arquitetura da solução consiste em um conjunto de ferramentas com capacidade de descobrir automaticamente as interfaces sob monitoramento, além de coletar evidências de tais máquinas e armazená-las. O processo de auto-descoberta e associação das evidências com usuários de rede é realizado por um motor baseado em ontologias, as quais são armazenadas em um banco de dados próprio. Entretanto, a proposta se concentra apenas no processo de coleta, enquanto a descrição dos mecanismos de armazenamento e transporte não é detalhada.

3.1.8 Abordagem de indexação de dados coletados para fins forenses

Na mesma vertente da solução de forense como serviço descrita na Seção 3.1.7, (LEE; UN, 2012) trata o problema de grande volume de dados coletados por meio de um serviço de coleta e indexação de evidências. O serviço espera receber dados da execução do comando unix DD (Unix Man Pages, c) nas máquinas alvo, onde, apoiado em processos ETL (*Extract, Transform and Load* – Extrair, Transformar e Carregar) e MapReduce (WIKIPEDIA, 2018), os dados são disponibilizados para consulta pelos investigadores. A coleta ocorre continuamente, em intervalos de tempo configuráveis. A Figura 7 mostra a arquitetura da solução.

Embora interessante, a solução não deixa claro onde os dados são armazenados, nem quem é responsável pela infraestrutura de armazenamento. Também não é discutido como os dados são transportados até o ponto de armazenamento, nem como garantir que esses dados não sejam alterados no processo.

Figura 6: *Digital Forensic Framework for Cloud Environment*

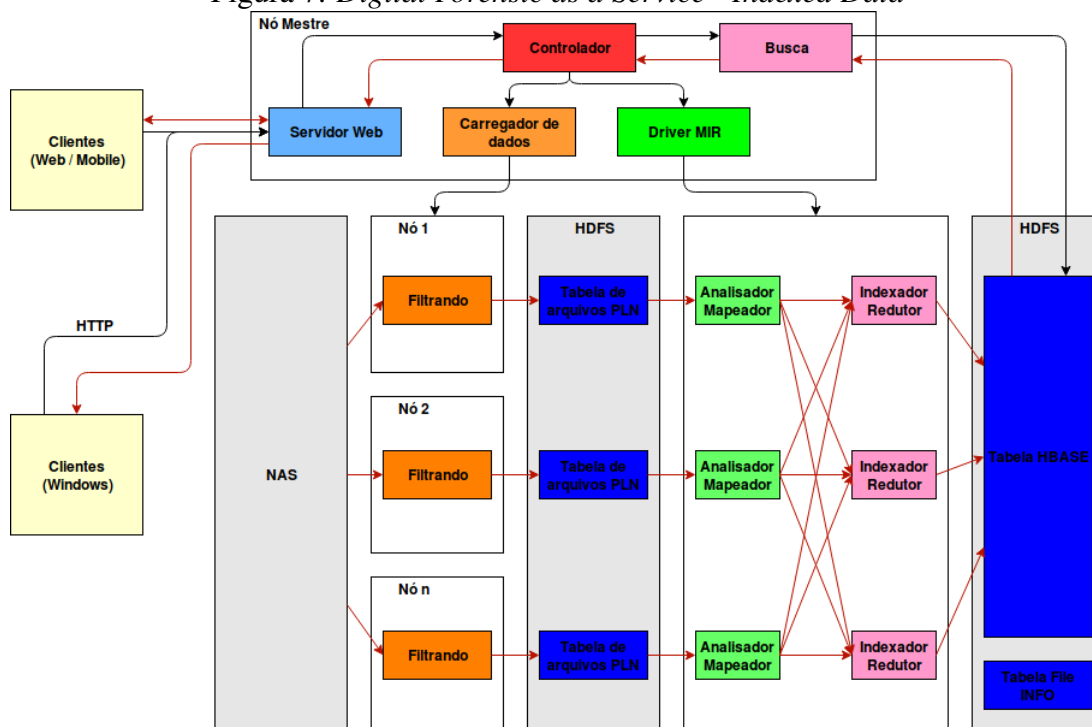


Adaptado de (GEORGE; VENTER; THOMAS, 2012)

3.2 Aspectos relacionados a coleta de evidência

Para uma discussão mais estruturada, a seguir os trabalhos mencionados na Seção 3.1.2 são agrupados e avaliados com base nos diferentes aspectos que abordam.

Figura 7: *Digital Forensic as a Service - Indexed Data*



Adaptado de (LEE; UN, 2012)

3.2.1 Acessar e coletar as informações de memória das máquinas virtuais em nuvem

Diversos trabalhos de análise forense na nuvem se concentram na coleta de dados “após o fato”, ou seja, após a intrusão ser detectada (REICHERT; RICHARDS; YOSHIGOE, 2015; POISEL; MALZER; TJOA, 2013; DYKSTRA; SHERMAN, 2013; GEORGE; VENTER; THOMAS, 2012; SANG, 2013). Os processos de coleta descritos nesses trabalhos podem ser iniciados de forma manual ou automaticamente, via integração com um mecanismo de detecção de intrusão. No caso específico de memória volátil, tal forma de coleta não consegue descrever como era a memória antes da intrusão, pois o processo só é acionado depois da detecção do ataque. Tal limitação pode trazer prejuízos à investigação, dado que algumas análises dependem exatamente da capacidade de se comparar dois momentos da memória (CASE et al., 2014). Entre os trabalhos estudados, a única proposta encontrada que leva tal necessidade em

consideração é (DEZFOULI et al., 2012), que propõe que o dado seja armazenado no próprio equipamento sob análise. Infelizmente, entretanto, a aplicação de tal abordagem no cenário em nuvem é pouco viável, pois pode levar à perda de informações importantes caso a máquina virtual ou contêiner seja desativada, tendo seus recursos liberados.

Existem ainda trabalhos voltados à coleta de informações durante a execução do sistema, nos quais os dados são constantemente coletados sem distinção do que aconteceu antes ou depois do fato de interesse. Esse é o caso de trabalhos como (POISEL; MALZER; TJOA, 2013; DYKSTRA; SHERMAN, 2013; SANG, 2013; DOLAN-GAVITT et al., 2011), que adotam a estratégia de isolar e parar a máquina virtual para em seguida realizar o processo de coleta. Embora interessantes, as abordagens descritas nesses trabalhos podem levar a um elevado volume de dados coletados. Além disso, elas não tratam o cenário em que é necessário coletar evidências quando são liberados os recursos virtuais que as contêm.

3.2.2 Capacidade de reproduzir o processo e obter os mesmos resultados

Se, durante uma análise forense, analistas diferentes obtêm resultados distintos ao executar o mesmo procedimento de coleta, a evidência gerada não tem credibilidade, inviabilizando seu uso em um processo legal. Por essa razão, a reprodutibilidade do processo de coleta é uma parte importante da geração de evidências para análise forense. Infelizmente, entretanto, nenhuma das propostas encontradas na literatura atualmente permite tal reprodutibilidade em cenários de nuvem, em que máquinas virtuais ou contêineres são desativados e seus recursos físicos liberados. Afinal, todas elas dependem da existência do recurso virtual para a repetição do processo de coleta.

3.2.3 Não violar privacidade ou jurisdição das partes não envolvidas na investigação

Em um ambiente de nuvem pública, remover o *hardware* para análise posterior pode levar à violação de privacidade de usuários. A razão é que o multi-inquilinato desse cenário faz com que uma mesma máquina física guarde informações de diversos clientes, alguns dos quais podem não estar envolvidos na investigação em curso. Diversos trabalhos na literatura tratam esse problema adequadamente, por meio de duas estratégias principais: a primeira, adotada em (REICHERT; RICHARDS; YOSHIGOE, 2015; GEORGE; VENTER; THOMAS, 2012; POISEL; MALZER; TJOA, 2013; DYKSTRA; SHERMAN, 2013; LEE; UN, 2012), consiste em coletar dados pertinentes à investigação e armazená-los fora da nuvem; a segunda, empregada em (SANG, 2013) e que constitui um caso específico de (GEORGE; VENTER; THOMAS, 2012), depende da cooperação do provedor de serviços de nuvem para conseguir as informações necessárias à investigação. Dependendo do provedor de serviços de nuvem é uma estratégia pouco recomendada, entretanto, pois (1) o volume de dados de usuários pode forçar os provedores a limitar o tamanho dos *logs* armazenados, e (2) caso ocorra uma indisponibilidade causada por um ataque, o objetivo do provedor será o de restabelecer o serviço, não necessariamente o de preservar evidências (ALQAHTANY et al., 2015).

3.2.4 Garantir a cadeia de custódia da evidência

Dentre os trabalhos analisados, apenas (SANG, 2013) aborda a questão da garantia da cadeia de custódia. Especificamente, o trabalho emprega *hashes* para verificar a integridade da evidência, permitindo a detecção de alterações. Uma limitação desse trabalho, entretanto, é que ele não deixa explícitos os mecanismos que poderiam ser utilizados para impedir acesso não autorizado (e, assim, potencial alteração) aos próprios *hashes*. As propostas dos outros autores concentram-se apenas no aspecto técnico

4 PROPOSTA DE PROJETO: DIZANG

A presente proposta tem como objetivo principal coletar memória de recursos computacionais virtuais de modo a conseguir: (1) identificar a fonte da evidência, mesmo se o recurso virtual não existir mais; (2) descrever o sistema antes e depois do incidente; (3) transportar e armazenar a memória coletada de uma forma que garanta sua integridade e confidencialidade; e (4) não violar a jurisdição e a privacidade de outros usuários que porventura tenham recursos alocados no mesmo servidor físico. A solução aqui apresentada, denominada Dizang , é descrita em detalhes a seguir.

4.1 Descrição

Em sistemas computacionais executados sobre uma infraestrutura física (i.e., não virtualizada), pode-se fazer uma associação direta entre um recurso qualquer e sua origem correspondente, seja esse recurso uma informação da memória, imagem de disco ou pacotes trafegando na rede. Já em sistemas construídos sobre uma infraestrutura virtual, em especial quando ela é auto-escalável, os recursos computacionais são altamente voláteis e, portanto, podem ser desalocados a qualquer momento.

Para conseguir correlacionar uma evidência a sua origem volátil, é necessário utilizar outro elemento em que persista a relação fonte-evidência. Na presente proposta, isso é feito por meio de contêineres linux (LXC). Embora um contêiner seja um *software* e, portanto, também volátil, cada imagem compilada e sua execução na forma de contêiner são normalmente atrelados a um *hash* que identifica univocamente essa

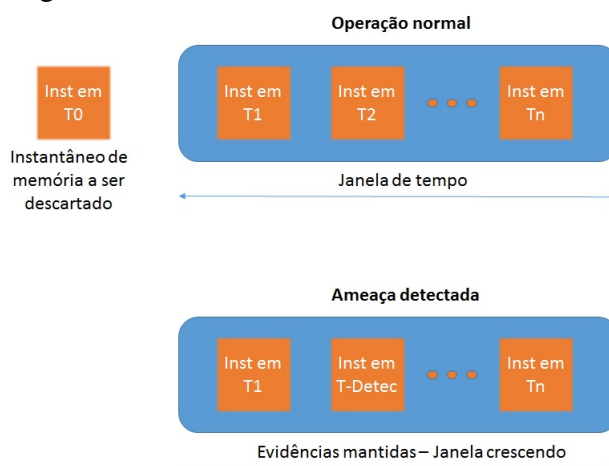
relação. O contêiner também permite identificar com mais precisão a fonte de uma evidência, uma vez que é possível dividir as partes de um sistema em contêineres: por exemplo, um contêiner para o motor de páginas dinâmicas (e.g., Apache), outro com a lógica de negócios (e.g., *golang*) e um terceiro para um banco de dados (e.g., *Cassandra*).

A cópia de memória não é uma atividade atômica, pois ela é executada em conjunto com outros processos. Portanto, caso um desses processos seja um código malicioso apagando traços de sua existência da memória do contêiner, informações possivelmente importantes para a investigação podem acabar sendo perdidas. Com o objetivo de deixar o processo de cópia da memória mais atômico, Dizang interrompe temporariamente a execução do contêiner, realiza a cópia de sua memória, e em seguida retoma sua execução. Essa técnica, que é semelhante àquela adotada em (RAFIQUE; KHAN, 2013) para VMs, produz um instantâneo da memória volátil do contêiner; isso permite sua análise em um estado de repouso, ou seja, sem a necessidade de ter o contêiner em execução. Ao realizar a coleta em intervalos de tempo adequados, é possível construir um histórico do estado da memória durante a execução no contêiner.

A maioria das técnicas forenses mais usadas atualmente são voltadas à obtenção da informação em sua totalidade. Isso comumente é feito via cópia bit a bit ou por meio da obtenção do *hardware* físico (SIMOU et al., 2014) (BEM et al., 2008). Embora tais técnicas possam parecer interessantes à primeira vista, elas muitas vezes acabam sendo responsáveis por um problema: o crescente volume de informações que os investigadores precisam analisar (QUICK; CHOO, 2014). Para mitigar essa dificuldade, em Dizang são adotadas duas estratégias: a primeira é a definição de um volume de dados que possa ser considerado *suficiente* para a realização de uma investigação; a segunda é a definição de uma *idade máxima* para a evidência enquanto o sistema trabalha em condições normais, isto é, quando não está sob ataque. Para detectar e analisar intrusões na memória de processos, é necessário ter uma cópia da memória antes e depois

da intrusão (CASE et al., 2014). Assim, a solução proposta implementa uma janela de instantâneos de memória cobrindo um intervalo de tempo pré-definido, como ilustrado na Figura 8. Em condições normais de operação, as evidências são coletadas com certa periodicidade e coletas que atingem uma determinada idade são descartadas. Em contraste, após a detecção de um evento de ataque (e.g., por um sistema de detecção de intrusões), Dizang deixa de descartar as coletas mais antigas do *log* de monitoramento. Como resultado, é possível conhecer o sistema antes e depois do ataque e, assim, avaliar sua evolução.

Figura 8: Janela deslizante de coleta de evidência

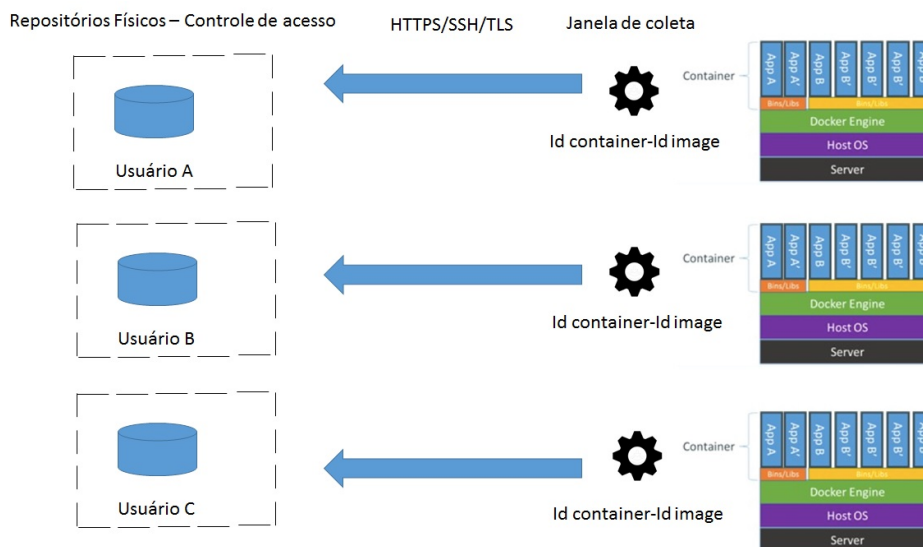


Fonte: Próprio autor

Finalmente, para persistir a relação evidência-origem e garantir a sua integridade, Dizang calcula o hash do par [evidência, identificador da imagem do contêiner] e armazena a tripla [hash, identificador da imagem do contêiner, evidência]. Adicionalmente, a presente proposta evita eventuais problemas com o armazenamento desses dados em países com jurisdições diferentes daquelas que devem ser aplicadas na investigação em questão. Especificamente, as evidências coletadas são armazenadas em um local físico fora da nuvem, após serem transportadas por meio de um canal seguro (e.g., via TLS (*Transport Layer Security* – Camada de Transporte Seguro) (Dierks T, 2008)).

4.2 Implementação

Figura 9: Arquitetura geral da solução Dizang



Fonte: Próprio autor

Os mecanismos propostos foram implementados em uma plataforma de testes visando avaliar a eficácia de Dizang em coletar as informações de memória dos contêineres de forma reproduzível, sem violar jurisdições ou a privacidade de usuários. A solução, ilustrada na Figura 9, consistiu na criação de 1 VM (*Virtual Machine* – Máquina Virtual) usando o Oracle Virtual Box 5.0 (ORACLE,) em um notebook Intel i5 de 2.30Mhz e 4Gb de RAM com sistema operacional de 64 bits. Essas VMs possuem 2 Gb de memória RAM e emulam apenas 1 processador, e em cada uma delas foi instalado o Docker Engine 1.10e a API Docker 1.21, com os quais foram criados 3 contêineres executando o nginx 1.0em diferentes portas.

Usando uma aplicação Java que descobre o identificador de processo associado a cada contêiner, pode-se copiar conteúdo do *descriptor de alocação de memória não uniforme* (`/proc/pid/numa_maps`). Assim, obtém-se a alocação das páginas de memória, os nós que estão associados a essas páginas, o que está alocado e suas respectivas políticas de acesso (Unix Man Pages, e). A cópia e gravação do arquivo é tal que,

a cada minuto, a aplicação: (1) pausa o contêiner em questão; (2) copia a diretório **numa_maps**; (3) concatena os dados obtidos com o *hash* de identificação da imagem do contêiner; (4) calcula o *hash* do conjunto; e (5) salva o resultado em um arquivo cujo nome é o identificador da imagem do contêiner e a extensão é **.mem**. Após a conclusão do processo de cópia, a mesma aplicação verifica se existem arquivos **.mem** em disco mais antigos que um certo intervalo de tempo “t”, descartando-os em caso positivo.

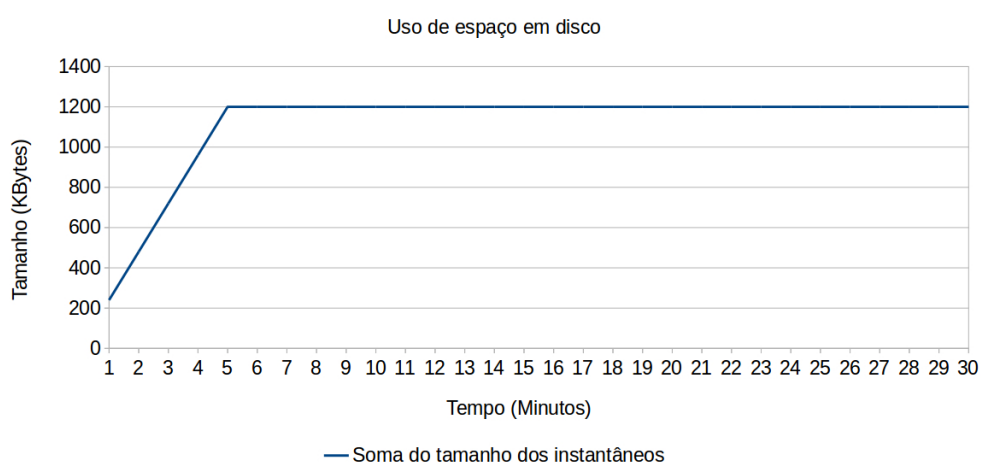
4.3 Resultados experimentais preliminares

Para avaliar a efetividade de Dizang na coleta de evidências, alguns experimentos foram realizados usando o ambiente implementado (descrito na Seção 4.2). Primeiramente, o sistema foi configurado para realizar coletas de memória em intervalos de 1 minuto, salvá-las em disco externo e apagar amostras coletadas há mais de 5 minutos. O sistema foi então executado por 30 minutos, tempo durante o qual foram coletadas como métricas (1) o uso de espaço em disco utilizado pelos instantâneos de memória salvos e (2) o tempo de pausa no contêiner necessário para a cópia delas. A cada coleta, foi executado o comando `du -sh *.mem` do *Unix* no disco de armazenamento externo, para retornar a lista dos arquivos onde os instantâneos de memória foram armazenados e o espaço em disco ocupado pelos mesmos. Ao fim do experimento, os contêineres foram removidos.

A ocupação em disco devido aos instantâneos de memória capturados durante o experimento é mostrada no gráfico da Figura 10. O gráfico mostra que o aumento do uso do espaço em disco é linear e o crescimento se interrompe quando é atingido o limite de tempo configurado para a janela, pois as coletas com tempo de vida maior que tal limite são apagadas do disco. Assim, que a solução mantém sob controle o espaço em disco ocupado pelas amostras coletadas. Ao mesmo tempo, instantâneos de memória salvos pela solução depois que os contêineres são removidos continuam

no disco da máquina, podendo ser associados a sua origem (i.e., contêiner e imagem), conforme esperado para uma análise forense. Essa capacidade se mantém após a detecção de uma ameaça, pois nesse caso coletas mais antigas deixam de ser apagadas. Logo, é possível descrever o estado do sistema antes e depois do incidente (CASE et al., 2014), permitindo-se, por exemplo, que ataques de injeção de código em memória sejam analisados.

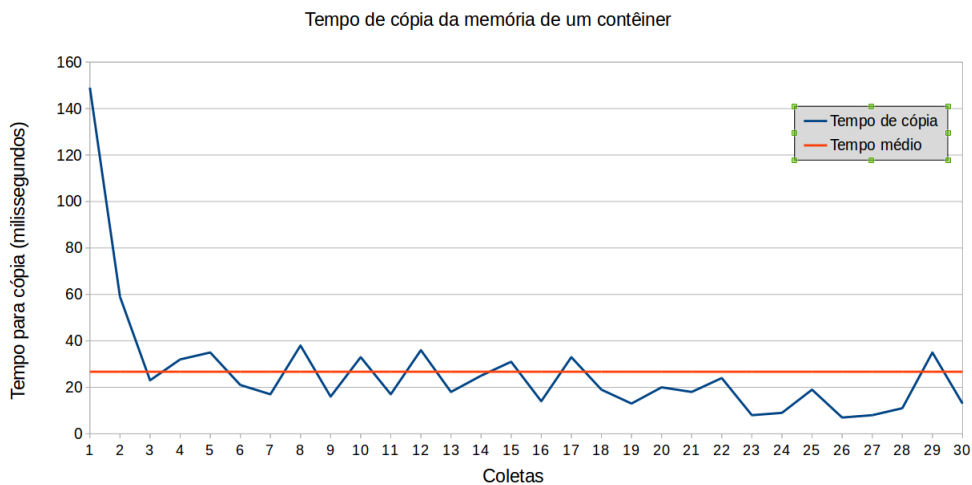
Figura 10: Evolução do uso do espaço em disco com o Dizang



Fonte: Próprio autor

Uma potencial limitação da solução proposta é que a pausa de um contêiner para coleta de dados poder, em princípio, causar perdas no desempenho da aplicação sendo executada. Para avaliar esse impacto, durante o experimento foram medidos os tempos de cópia da memória do contêiner. Os resultados são mostrados no gráfico da Figura 11. É possível notar que, após a inicialização da aplicação, o tempo para realizar a cópia é bastante reduzido, variando entre 20 e 40 milissegundos. Em especial, para contêineres executando um motor de páginas web dinâmicas, como é o caso do experimento em questão, essa latência deve ser pouco perceptível por usuários finais.

Figura 11: Tempo de cópia da memória de um contêiner



Fonte: Próprio autor

4.4 Limitações

Como a solução descrita tem como foco coletar informações de memória no espaço do usuário (*user space*), ela não consegue acessar o espaço de kernel (*kernel space*). Assim, Dizang em princípio não provê suporte a técnicas de investigação de malware que se baseiam em informações do *kernel space*. Isso inclui, por exemplo, a comparação de informações do PEB (*Process Environment Block* – Bloco para o Ambiente dos Processos), que ficam no *user space*, com informações do VAD (*Virtual Address Descriptor* – Descritor de Endereços de Memória Virtual), que fica no *kernel space*. Análise de ameaças do tipo DKOM (*Direct Kernel Object Manipulation* – Manipulação Direta dos Objetos do Kernel) também não se beneficiam com a solução aqui proposta.

5 CONCLUSÃO

Ameaças digitais que atuam diretamente na memória de sistema não costumam deixar rastros em disco após terem os recursos correspondentes desalocados, dificultando análises forenses posteriores. Esse problema é especialmente notável em sistemas de computação em nuvem, nos quais a alocação e desalocação de recursos virtualizados (e.g., VMs e contêineres) é frequente. Essa característica, aliada a aspectos como multi-inquilinato e multi-jurisdição de nuvens computacionais, dificulta a coleta de evidências para a investigação de incidentes.

Nesse cenário, a proposta apresentada visa relacionar o instantâneo de memória a sua origem, utilizando o *hash* calculado da imagem do contêiner como identificador da evidência armazenada. Para evitar uso excessivo de memória, a quantidade de dados armazenados usa uma janela de armazenamento, o que permite descrever a memória antes e depois de um ataque (e.g., de injeção de memória). Combinada com uma ferramenta para identificação de ameaças, essas características de Dizang o transformam em uma solução poderosa para prover evidências e, assim, viabilizar análises forenses na nuvem.

MARCOS: Er... isso era o trabalho futuro no artigo, quando você podia dizer absolutamente qualquer coisa. Na qualificação, só diga que é trabalho futuro aquilo que DE FATO você pretender fazer: você será cobrado por isso na defesa da dissertação... Vai fazer isso? Se for, não vai aqui, mas sim na seção em que você descreve os próximos passos.

Como trabalho futuro, pretende-se estudar o impacto provocado pela pausa do contêiner no desempenho de um sistema em produção e realizar uma análise da memória dos contêineres deste mesmo sistema utilizando as coletas feitas por Dizang . Com esses resultados pretende-se implementar uma ferramenta mais flexível, que não precise ter acesso a memória completa da máquina, requisito comum de ferramentas de análise de malware atuais (e.g., FROST (DYKSTRA; SHERMAN, 2013) e Volatility Framework (Volatility Foundation, 2014)).

5.1 Cronograma esperado para os próximos passos

MARCOS: Mais atenção ao tempo verbal... você fica usando frases no futuro para as fases 1 e 2, e depois diz que já foram executadas (=passado)...?! Só confunde o leitor...

A execução da presente proposta foi planejada para ser executada em três fases, das quais as duas primeiras foram executadas, conforme discutido a seguir.

A primeira fase teve por objetivo encontrar uma forma de relacionar a evidência coletada de um contêiner a sua origem de forma que o processo seja reproduzível. Para atingir este objetivo, foi implementado um protótipo de coleta de memória de uma máquina virtual executando contêineres em um computador físico. A associação da evidência de memória coletada do contêiner de uma máquina virtual foi associada a sua origem através do *hash* de identificação da imagem do contêiner, e o processo de coleta foi reproduzido com sucesso diversas vezes.

A segunda fase teve por objetivo encontrar uma forma de transportar a evidência coletada a um local de armazenamento garantindo a cadeia de custódia. Para atingir este objetivo, foi definida uma cadeia de custódia, de modo que os evidência em memória geradas em uma nuvem computacional pudessem ser transportados para uma máquina física fora da nuvem. O transporte da evidência foi realizado usando TLS a

assinatura dos dados.

Finalmente, a terceira fase esperada para o projeto, que consiste no próximo passo para a conclusão do mestrado, tem por objetivo a realização da análise experimental de alguma vulnerabilidade específica, utilizando-se do material coletado na primeira fase do projeto. As ações para se atingir este objetivo serão realizadas em um computador físico com ferramental voltado à análise forense em memória. A execução dessa fase deve seguir o cronograma descrito na Figura 12, que consiste nas seguintes atividades:

- **Estudo das ferramentas de análise de memória:** serão avaliadas ferramentas de análise de memória na busca por alguma solução que consiga decodificar as informações coletadas;
- **Implementação / seleção de uma ferramenta de análise:** será selecionada uma das ferramentas estudadas na atividade anterior. Caso nenhuma se mostre adequada, será implementada uma ferramenta própria;
- **Realização de análises com a ferramenta escolhida / criada:** será analisado um malware real, utilizando-se o processo de coleta definido por Dizang .

Figura 12: Cronograma de projeto.

Atividade / mês	2018												2019							
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago
I																				
II																				
III																				
IV																				
V																				
I	Acompanhamento do estado da arte																			
II	Estudo das ferramentas de análise de memória																			
III	Implementação / seleção de uma ferramenta de análise																			
IV	Realização de análises com a ferramenta escolhida / criada																			
V	Escrita e defesa de tese																			

Fonte: Próprio autor

REFERÊNCIAS

ALQAHTANY, S. et al. Cloud forensics: A review of challenges, solutions and open problems. In *Int. Conference on Cloud Computing (ICCC)*. Plymouth, UK: IEEE, 2015. p. 1–9.

BEM, D. et al. Computer forensics - past , present and future. *Journal of Information Science and Technology*, vol. 5, no. 3, p. 43–59, 2008.

BERNSTEIN, D. Containers and cloud: From LXC to Docker to Kubernetes. *IEEE Cloud Computing*, vol. 1, no. 3, p. 81–84, Sept 2014. ISSN 2325-6095.

CASE, A. et al. *The Art of Memory Forensics: Detecting malware and threats in Windows, Linux and Mac memory*. Hoboken, NJ: Wiley, 2014.

Chef. *Chef*. <https://www.chef.io>. Acessado em: 16-04-2018.

DEZFOULI, F. et al. Volatile memory acquisition using backup for forensic investigation. In *Int. Conf. on Cyber Security, Cyber Warfare and Digital Forensic (CyberSec)*. Plymouth, UK: IEEE, 2012. p. 186–189.

Dierks T, R. E. *The Transport Layer Security (TLS) Protocol*. Fremont, CA: IETF, 2008. IETF: <https://tools.ietf.org/html/rfc5246>.

DOLAN-GAVITT, B. et al. Virtuoso: Narrowing the semantic gap in virtual machine introspection. In *IEEE Symposium on Security and Privacy*. Plymouth, UK: IEEE, 2011. p. 297–312. ISSN 1081-6011.

DYKSTRA, J.; SHERMAN, A. Acquiring forensic evidence from infrastructure-as-a-service cloud computing: Exploring and evaluating tools, trust, and techniques. *Digital Investigation*, Elsevier Ltd, vol. 9, p. S90–S98, 2012. ISSN 17422876. (Proc. of the 12th Annual DFRWS Conference). Available from Internet: [dx.doi.org/10.1016/j.diin.2012.05.001](https://doi.org/10.1016/j.diin.2012.05.001).

DYKSTRA, J.; SHERMAN, A. T. Design and implementation of FROST: Digital forensic tools for the OpenStack cloud computing platform. *Digital Investigation*, Elsevier Ltd, vol. 10, p. S87–S95, 2013. ISSN 17422876. (Proc. of 13th Annual DFRWS Conference). Available from Internet: [dx.doi.org/10.1016/j.diin.2013.06.010](https://doi.org/10.1016/j.diin.2013.06.010).

FEWER, B. S. Reflective DLL Injection. no. October, 2008.

GEORGE, S.; VENTER, H.; THOMAS, F. Digital Forensic Framework for a Cloud Environment. In *IST Africa*. Tanzania: IIMC, 2012. p. 1–8. ISBN 9781905824342.

GILBERT, P.; SUJEET, S. *Advances in Digital Forensics IV*. 1. ed. Orlando: Springer-US, 2008. vol. 1. ISSN 1098-6596. ISBN 9788578110796.

GOOGLE. *GRR Rapid Response*. 2013. Available from Internet: <<http://www.grr-response.com/faq.html>>.

GRISPOS, G.; STORER, T.; GLISSON, W. Calm before the storm: the challenges of cloud computing in digital forensics. *International Journal of Digital Crime and Forensics*, vol. 4, no. 2, p. 28–48, 2012. ISSN 1466640073. Available from Internet: <www.igi-global.com/article/calm-before-storm/68408>.

LEE, J.; UN, S. Digital Forensics as a Service: A case study of forensic indexed search. p. 499–503, 2012.

LINUXCONTAINERS.ORG. *Linux Containers (LXC)*. 2015. Available from Internet: <<https://linuxcontainers.org/lxc/introduction/>>.

LUIS, P.; SANCHEZ, P.; GIOVA, G. Digital Chain of Custody Quality Assessment. *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, vol. 16, no. 4, p. 41–48, 2016. ISSN 17387906.

MELL, P.; GRANCE, T. *The NIST definition of cloud computing*. 2011. 7 p. NIST SP 800-145. Available from Internet: <csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-145/SP800-145.pdf>.

MILLER, M.; TURKULAINEN, J. *Remote Library Injection*. 2004. Tech. Report: <www.nologin.org/Downloads/Papers/remote-library-injection.pdf>.

MORSY, A. M.; GRUNDY, J.; MULLER, I. An Analysis of the Cloud Computing Security Problem. In *APSEC Cloud Workshop*. Sydney, Australia: Cornell University, 2010. Available from Internet: <<https://arxiv.org/abs/1609.01107>>.

ORACLE. *Virtual Box 5.1*. Available from Internet: <<https://www.virtualbox.org/>>.

POISEL, R.; MALZER, E.; TJOA, S. Evidence and cloud computing: The virtual machine introspection approach. *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, vol. 4, no. 1, p. 135–152, 2013. ISSN 20935374 (ISSN). Available from Internet: <citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.469.937>.

Puppet. *Puppet*. <https://puppet.com/>. Acessado em: 16-04-2018.

QUICK, D.; CHOO, K. K. R. Impacts of increasing volume of digital forensic data: A survey and future research challenges. *Digital Investigation*, Elsevier Ltd, vol. 11, no. 4, p. 273–294, 2014. ISSN 17422876. Available from Internet: <dx.doi.org/10.1016/j.diin.2014.09.002>.

RAFIQUE, M.; KHAN, M. N. A. Exploring Static and Live Digital Forensics: Methods, Practices and Tools. *IJSER*, vol. 4, no. 10, p. 1048–1056, 2013. Available from Internet: <www.ijser.org/researchpaper/5CEXploring-Static-and-Live-Digital-Forensic-Methods-Practices-and-Tools>.

RAHMAN, S.; KHAN, M. N. A. Review of live forensic analysis techniques. *International Journal of Hybrid Information Technology*, vol. 8, no. 2, p. 379–388, 2015. Available from Internet: <www.sersc.org/journals/IJHIT/>.

RAMOS, M. G. *Do Valor Probatório do Arquivo Digital*. PhD Thesis (PhD) — Universidade de Brasília, 2011.

REICHERT, Z.; RICHARDS, K.; YOSHIGOE, K. Automated forensic data acquisition in the cloud. *IEEE Int. Conf. on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems*, p. 725–730, 2015.

Right Scale. *State of the Cloud Report*. 2017. <www.rightscale.com/lp/state-of-the-cloud>.

SANG, T. A log-based approach to make digital forensics easier on cloud computing. *Intelligent System Design and Engineering Applications (ISDEA)*, p. 91–94, 2013.

SIMOU, S. et al. Cloud forensics: Identifying the major issues and challenges. In *Advanced Information Systems Engineering (CAiSE 2014)*. Cham, CH: Springer International Publishing Switzerland 2014, 2014. vol. 8484, p. 271–284. ISBN 9783319078809. ISSN 16113349.

STACK, O. *OPen Stack Framework*. 2018. Available from Internet: <<https://www.openstack.org>>.

Unix Man Pages. *cgroups - Control Groups*. <<http://man7.org/linux/man-pages/man7/cgroups.7.html>>. Acessado em: 15-09-2017.

_____. *chroot - Change Root command*. <<http://man7.org/linux/man-pages/man1/chroot.1.html>>. Acessado em: 24-09-2017.

_____. *dd - convert and copy a file*. <<http://man7.org/linux/man-pages/man1/dd.1.html>>. Acessado em: 01-12-2017.

_____. *Namespacing*. <<http://man7.org/linux/man-pages/man7/namespaces.7.html>>. Acessado em: 15-09-2017.

_____. *Numa Maps - Non Uniform Memory Architecture*. <man7.org/linux/man-pages/man7/numa.7.html>. Acessado em: 24-06-2017.

Vagrant. *Vagrant*. <https://www.vagrantup.com/>. Acessado em: 16-04-2018.

Volatility Foundation. *Volatility Framework*. 2014. <www.volatilityfoundation.org/>. Acessado em: 24-06-2017.

VöMEL, S.; STÜTTGEN, J. An evaluation platform for forensic memory acquisition software. *Digit. Investig.*, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, vol. 10, p. S30–S40, 2013. ISSN 1742-2876. Elsevier Science Publishers. Available from Internet: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.diin.2013.06.004>>.

WIKIPEDIA. *MapReduce*. 2018. Available from Internet: <<https://en.wikipedia.org/wiki/MapReduce>>.