

Dizang: Uma solução para coleta de evidências forenses de ataques de injeção na nuvem

Hamilton Fonte II, Marcos A. Simplicio Jr.

Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP) São Paulo, SP, Brasil

Email: hamiltonii@gmail.com, mjunior@larc.usp.br

Abstract—A adoção de arquiteturas em nuvem aumenta a cada dia, e com ela 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. Este trabalho analisa propostas na literatura voltadas a resolver os principais desafios existentes na coleta de evidências na nuvem, discutindo suas limitações, e então propõe uma solução que cobre coleta, transporte e armazenamento da evidência visando suplantá-las. A solução aqui proposta prevê uma forma de correlacionar evidências e sua origem virtual, permitindo transportar e armazenar tais dados sem afetar sua credibilidade. Especificamente, ela tem como focos (1) a reprodutibilidade do processo de coleta e (2) a garantia de custódia da evidência.

I. INTRODUÇÃO

Técnicas de virtualização, replicação de serviços e compartilhamento de recursos entre múltiplos usuários (multi-inquilinato) proveem a nuvens computacionais uma elevada escalabilidade [1]. Ao mesmo tempo, tais mecanismos também criam uma elevada 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 (*virtual machines* – VMs) que a hospedam e balancear a carga entre elas, de modo a atender à demanda 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 custos desnecessários.

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, caso 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., arquivos de *log*), as evidências desse evento podem ser completamente perdidas após elas 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 [2]. Especificamente, o aspecto multi-inquilino dificulta a obtenção do *hardware* que executa as aplicações de interesse, pois, 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 à investigação em vários países, dificultando a obtenção das mesmas em especial quando não existem acordos de cooperação entre as entidades envolvidas [3]. Combinadas, tais características dificultam a coleta de evidências com a credibilidade necessária para que elas possam ser usadas em processos legais, o que exige o respeito à privacidade, à jurisdição e à cadeia de custódia, bem como a reprodutibilidade do processo de coleta [4].

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 [5] e [6] tratam de fatores como multi-inquilinato e multi-jurisdição, discutindo formas de coleta e preservação da evidência fora da nuvem. Já estudos como [7] se concentram na análise forense para a coleta de evidência de máquinas virtuais enquanto elas estão em execução, enquanto trabalhos como [8] abordam a questão de processos de garantia de 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 VM) seja desalocada, haja condições de se reproduzir o processo de coleta de evidências.

O presente trabalho visa suplantiar tais limitações por meio de uma proposta que tem como focos (1) a reprodutibilidade do processo de coleta e (2) a garantia de custódia da evidência. Em suma, a solução descrita prevê uma forma de correlacionar evidências e sua origem virtual, permitindo transportar e armazenar tais dados de modo a preservar sua credibilidade. Para isso, a proposta supõe que o sistema sendo monitorado é executado dentro de um contêiner em nuvem. O foco da solução em contêiner se justifica pelo crescimento da adoção de containerização nos últimos anos, bem como pela previsão de que este será o modelo de implementação mais usado em aplicações futuras [9]. A solução tem como alvo específico ataques de injeção de código [10], pois estes, quando usados contra uma arquitetura em nuvem, não deixam rastros quando recursos de processamento virtuais são desativados e sua memória é liberada [11], [10]. Em particular, têm especial interesse quatro tipos específicos dessa família de ameaças [10]:

- **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. Esta 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 [12].

- **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 [13].
- **Injeção de processo vazio:** Um processo malicioso dispara uma instância de um processo legítimo no estado “suspensão”; a área do executável é então liberada e realocada com código malicioso.

O restante deste documento está organizado da seguinte forma. A Seção II discute brevemente soluções em nuvem e suas características. A Seção III analisa os trabalhos relacionados na área de forense de memória. A Seção IV detalha a solução proposta e avalia como ela trata os desafios alvo deste projeto. Finalmente, a Seção V apresenta algumas considerações finais e discute ideias para trabalhos futuros.

II. ADOÇÃO DE ARQUITETURAS EM NUVEM 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. [14] Há três modelos principais de comercialização de uso da nuvem [14]: *software* como serviço (*Software as a Service* – SaaS), na qual se provê o *software* que será usado pelo cliente; plataforma como serviço (*Platform as a Service* – PaaS), na qual se provê o ambiente para que o cliente desenvolva, teste e execute seu *software*; e, o tipo mais pertinente para este trabalho, Infraestrutura como serviço (*Infrastructure as a Service* – IaaS), na qual são fornecidos recursos computacionais básicos, como processamento e memória, em geral de forma virtualizada.

A virtualização de recursos na nuvem, embora tradicionalmente feita por meio de máquinas virtuais, vêm sendo crescentemente feita também na forma de contêineres. De fato, segundo o “Container Market Adoption Survey 2016”, realizado pelas empresas DevOps.com (<https://devops.com/>) e ClusterHQ (<https://clusterhq.com>) 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 micro-serviços em nuvem. Diferentemente de máquinas virtuais, que envolvem a criação de um *hardware* virtual e de um sistema operacional (SO) acima do sistema nativo e que opera independente deste, a virtualização com contêineres é feita no nível do SO nativo, tem uma implementação mais simples eliminando camadas entre o aplicativo executado e o *hardware* físico. Uma tecnologia bastante utilizada para esse propósito são Contêineres Linux (LXC) [15], que aproveitam-se de funcionalidades como *cgroups* e *namespacing* do kernel do Linux para auxiliar no gerenciamento e isolamento de recursos virtuais.

III. TRABALHOS RELACIONADOS

Existem vários aspectos relativos à análise forense na nuvem, indo desde a coleta de informações até a garantia da cadeia de custódia de evidências. Para uma discussão mais estruturada dos trabalhos disponíveis na literatura sobre o tema, a seguir eles são apresentados com base nos diferentes aspectos que abordam.

A. 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 [6], [16], [5], [7], [8]. 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 [10]. Entre os trabalhos estudados, a única proposta encontrada que leva tal necessidade em consideração é [17], 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 [16], [5], [8], 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 de também não tratarem o cenário em que é necessário coletar evidências quando os recursos virtuais contendo tais informações são liberados.

B. 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: todas elas dependem da existência do recurso virtual para a repetição do processo de coleta.

C. 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, uma vez 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 das duas estratégias principais: a primeira, adotada em [6], [7], [16], [5], consiste em coletar dados pertinentes à investigação e armazená-los fora da nuvem; a segunda, empregada em [8] e que constitui um caso específico de [7], 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[18].

D. Garantir a cadeia de custódia da evidência

Dentre os trabalhos analisados, apenas [8] 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 na mesma, embora não explique 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 da coleta, sem discutir claramente garantia de custódia mas apenas mencionando que as evidências devem ser coletadas de forma “forensicamente aceitável”.

E. Resumo

A Tabela I mostra um comparativo das soluções estudadas, considerando os aspectos discutidos nesta seção, posicionando as contribuições da proposta apresentada neste trabalho.

TABLE I
COMPARATIVO DE SOLUÇÕES DE COLETA DE INFORMAÇÕES DE MEMÓRIA DE MÁQUINAS EM NUVEM PARA ANÁLISE FORENSE

	Coleta é contínua?	Reproduz o processo sem a VM?	Garante cadeia de custódia?	Preserva jurisdição e privacidade?
Dizang(esta proposta)	✓	✓	✓	✓
[7]	✗	✗	✗	✓
[16]	✗	✗	✗	✓
[5]	✗	✗	✗	✓
[19]	✗	✗	✗	✓
[6]	✗	✗	✓	✓
[8]	✓	✗	✓	✓
[20]	✗	✗	✗	✓
[21]	✗	✗	✗	✓
[17]	✓	✗	✗	✓
[22]	✓	✗	✓	✓

IV. SOLUÇÃO PROPOSTA: DIZANG

A presente proposta tem como objetivo principal coletar memória de recursos computacionais virtuais de modo a conseguir: (1) identificar a fonte da evidência **COMMENT: Não ficou claro: fonte é o que? Usuário? Sistema? VM? Contêiner? Outra coisa? Hamilton: Feito**, 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.

A. Descrição

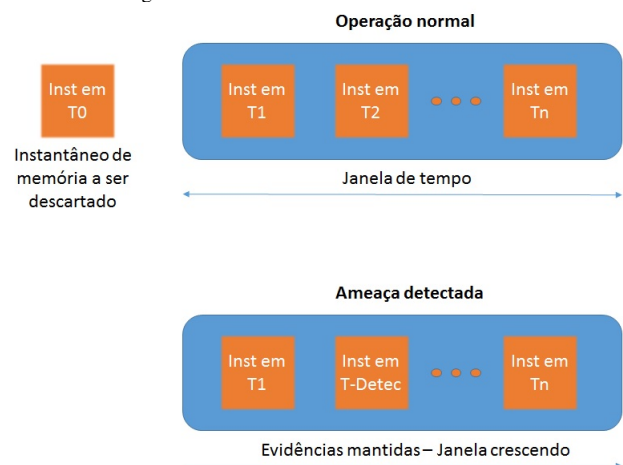
Em sistemas computacionais executados sobre uma infraestrutura física (i.e., não virtualizada), pode-se fazer uma associação direta entre um recurso qualquer, como uma informação da memória, imagem de disco ou pacotes trafegando na rede, e sua origem correspondente. **COMMENT: Eu tinha dito que uma alternativa para a questão de “máquina**

virtual vs. contêiner” era “trocar para algo como ‘recurso virtual’, que tem ‘sua memória liberada’”. Dizer “recurso virtual que tem seus recursos liberados” faz zero sentido... Hamilton: OK Já em sistemas construídos sobre uma infraestrutura virtual, em especial quando esta 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, o que na presente proposta é feito por meio de contêineres linux (LXC). TODO: Não entendi o “estão atrelados”: é sempre assim (ou seja, você quis dizer “são normalmente atrelados”) ou isso é parte da sua proposta (ou seja, você quis dizer “, na presente proposta, são atrelados”) - Hamilton: Feito 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. TODO: Não entendi a frase a seguir. Explique melhor o que você quis dizer com “contêiner com apenas parte da pilha da aplicação sendo monitorada” (talvez um exemplo ajude?). Hamilton: Feito 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 como por exemplo, um contêiner para o motor de páginas dinâmicas (*Apache*), outro com as lógicas de negócio (*golang*) e um terceiro para um banco de dados (*Cassandra*).

TODO: O parágrafo estava muito grande, então quebrei aqui. O problema é que falta uma frase para ligar a frase a seguir ao contexto da discussão... Coloque uma frase aqui, deixando claro qual requisito você quer satisfazer com essa ideia de “interromper temporariamente a execução do contêiner”. Aplique isso para TUDO que for proposta: o leitor tem que saber de antemão pra que você está fazendo alguma coisa, ou vai ficar se perguntando “Espera, mas pra que fazer isso?!” - Hamilton: acho que foi Uma cópia de memória não é uma atividade atômica [referência], ela concorre com outros processos. Um desses processos pode ser o código malicioso apagando traços de sua existência da memória do contêiner. De modo a tornar a cópia da memória atômica, a presente proposta 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 [23] para máquinas virtuais, 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. COMMENT: Use futuro apenas para coisas no futuro... Vai ser possível no futuro ou é possível no presente...? - Hamilton: é possível, OK Ao realizar a coleta em intervalos de tempo adequados, é possível construir um histórico do estado da memória durante a execução no contêiner. TODO: A ligação entre as frases anterior e a seguir está bem ruim... você parece estar mudando completamente de assunto... Acredito que faltou uma frase dizendo que “salvar toda a memória” pode se tornar um problema, reforçar isso com as duas frases que já estão a seguir, e depois dizer que

você vai resolver. A maioria das técnicas forenses praticadas atualmente são voltadas à obtenção da informação em sua totalidade, seja via cópia bit a bit, seja por meio da obtenção do *hardware* físico [24] [25]. Embora tais técnicas possam parecer interessantes à primeira vista, elas são hoje responsáveis por um problema: o crescente volume de informações que os investigadores precisam analisar [26]. COMMENT: Use passado apenas para coisas no passado... A proposta adotou essas duas estratégias, porém não adota mais (= passado) ou a proposta adotou e continua adotando essas estratégias (=presente)? - Hamilton: continua adotando, OK Para mitigar essa dificuldade, a presente proposta adotada 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 [10]. COMMENT: Er... se você tem “label”, é para poder usar “ref”... colocar os números diretamente é jogar fora uma das mais importantes ferramentas do LaTeX... Assim, a solução proposta implementa uma janela de instantâneos de memória cobrindo um intervalo de tempo pré-determinado, como ilustrado na Figura 1. 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), Dizangdeixa de descartar as coletas mais antigas do *log* de monitoramento, sendo possível conhecer o sistema antes e depois do ataque, avaliando sua evolução. COMMENT: Não sei por que você está utilizando \\ no final das suas frases, mas pare de fazer isso... deixe o LaTeX se virar com a formatação. No final, quando você tiver tudo escrito, aí pode fazer algum sentido se preocupar com formatação, mas não antes disso... - Hamilton: é pra formatação mesmo :) OK vou deixar o latex se virar

Fig. 1. Janela deslizante de coleta de evidência



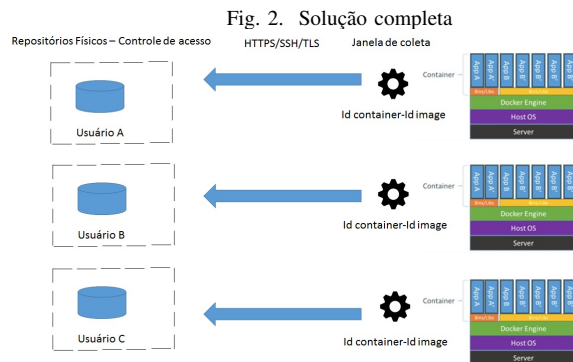
TODO: Essa frase não faz sentido: não se “assina” nada com um “hash”. Você pode “calcular o hash” ou “assinar um dado” (e.g., um dado juntamente com o hash de alguma coisa). **Revise essa frase...** - Hamilton: Feito Para persistir a relação evidência-origem e garantir a integridade da mesma, a presente proposta calcula o hash do par [evidência-identificador da imagem do contêiner] e armazena a tupla [hash-identificador da imagem do contêiner-evidência]. Para evitar eventuais problemas com o armazenamento desses dados em países com jurisdições diferentes daquelas que devem ser aplicadas na investigação em questão, as evidências coletadas são armazenadas em um local físico fora da nuvem, após serem transportadas por meio de um canal seguro (e.g., usando o protocolo *Transport Layer Security* – TLS).

B. Implementação

TODO: CLAREZA: quais ataques? Onde estão esses objetivos (diga a seção!!!)? Perceba que não tem qualquer seção com esse nome: você espera realmente que o leitor procure no seu texto onde eles estão...? Visando avaliar sua eficácia em auxiliar as tarefas a análise e identificação das formas de ataque enumeradas nos objetivos, os métodos propostos foram implementados em uma plataforma de testes. A implementação da solução ilustrada na figura 2 foi realizada em um notebook intel I5 de 2.30Mhz e 4Gb de RAM com sistema operacional de 64 bits. Nele, usando Oracle Virtual Box 5.0 foi criada uma máquina virtual com 2 Gb de memória RAM emulando apenas 1 processador. Na máquina virtual foi instalada a versão 1.10 do Docker Engine e 1.21 da API Docker, criados 3 contêineres cada um rodando um nginx 1.0 em diferentes portas. Escreveu-se uma aplicação em JAVA que descobre qual o identificador de processo associado a cada contêiner e copia o `/proc/pid/numa_maps`. A cópia e gravação do arquivo acontece da seguinte forma: a cada minuto a aplicação pausa o contêiner em questão, copia a diretório `numa_maps`, concatena com o `hash` de identificação da imagem do contêiner, calcula o `hash` do conjunto e o salva em um arquivo cujo nome é o identificador da imagem do contêiner e a extensão é `.mem`. Em seguida verifica quais o arquivos `.mem` mais antigos em disco, se for mais velho que o tempo 't', o arquivo é descartado.

C. Limitações

A solução está focada em coletar informações de memória do espaço do usuário (*user space*), ela não enxerga o espaço do kernel (*kernel space*). Técnicas de investigação de malware que se baseiam em informações do *kernel space* como por exemplo, a comparação de informações do bloco do ambiente do processo (*Process Environment Block* – PEB), que ficam no *user space*, com informações do descritor de endereços de memória virtual (*Virtual Address Descriptor* – VAD), que fica no *kernel space* não são possíveis. Outro exemplo é a análise de ameaças que realizam manipulação direta dos objetos do kernel (*D.K.O.M. - Direct Kernel Object Manipulation*) também não se beneficiam de associação com o contêiner.



V. CONCLUSOES FINAIS

Até o momento a presente proposta teve sucesso em relacionar o instantâneo de memória a sua origem através do `hash` de identificação da imagem, usou-se a versão 1.10 do Docker para tal fim. A versão é importante pois até a 1.9.x, o identificador da imagem era apenas um randômico. Na versão 1.10 ele passou a ser um `hash` calculado a partir da imagem. Apesar do sucesso em salvar a memória relacionadas ao contêiner e sua associação com a origem, não foi possível até o momento relizar uma análise das ameaças. As ferramentas de leitura de memória disponíveis no mercado requerem que todo o conteúdo da memória da máquina esteja disponível para realização da análise. Como é coletada apenas a memória relacionada aos processos, o ferramental não funciona. É necessário o desenvolvimento de uma ferramenta que trabalhe sem a memória completa da máquina, ou no caso da ferramenta *Volatility* é necessário a criação de um profile para a memória do processo

REFERENCES

- [1] A. M. Morsy, J. Grundy, and I. Muller, “An Analysis of the Cloud Computing Security Problem,” in *APSEC Cloud Workshop*, Sydney, Australia, 2010. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1609.01107>
- [2] R. Keyun, C. Joe, K. Tahar, and C. Mark, *Advances in Digital Forensics IV*, 7th ed., P. Gilbert and S. Sujeet, Eds., Orlando, 2011, vol. 1.
- [3] J. Dykstra and A. T. Sherman, “Acquiring forensic evidence from infrastructure-as-a-service cloud computing: Exploring and evaluating tools, trust, and techniques,” *Digital Investigation*, vol. 9, pp. S90–S98, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.diin.2012.05.001>
- [4] S. Rahman and M. N. A. Khan, “Review of live forensic analysis techniques,” *International Journal of Hybrid Information Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 379–388, 2015. [Online]. Available: <http://www.sersc.org/journals/IJHIT/>
- [5] J. Dykstra and A. T. Sherman, “Design and implementation of FROST: Digital forensic tools for the OpenStack cloud computing platform,” *Digital Investigation*, vol. 10, pp. S87–S95, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.diin.2013.06.010>
- [6] Z. Reichert, K. Richards, and K. Yoshigoe, “Automated forensic data acquisition in the cloud,” *Proceedings - 11th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, MASS 2014*, pp. 725–730, 2015.
- [7] S. George, H. Venter, and F. Thomas, “Digital Forensic Framework for a Cloud Environment,” in *IST Africa 2012*, P. Cunningham and M. Cunningham, Eds. Tanzania: International Information Management Corporation, 2012, pp. 1–8.
- [8] T. Sang, “A log-based approach to make digital forensics easier on cloud computing,” *Proceedings of the 2013 3rd International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, ISDEA 2013*, pp. 91–94, 2013.

- [9] S. F. Piraghaj, A. V. Dastjerdi, R. N. Calheiros, and R. Buyya, "A Framework and Algorithm for Energy Efficient Container Consolidation in Cloud Data Centers," *Proceedings - 2015 IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems; 8th IEEE International Conference Cyber, Physical and Social Computing; 11th IEEE International Conference on Green Computing and Communications and 8th IEEE International Conference on Internet of Things, DSDIS/CPSCoM/GreenCom/iThings 2015*, pp. 368–375, 2016.
- [10] A. Case, M. Ligh, L. Jamie, and A. Walters, *The Art of Memory Forensics: Detecting malware and threats in Windows, Linux and Mac memory*, kindle ed. Wiley, 2014.
- [11] S. Vömel and J. Stüttgen, "An evaluation platform for forensic memory acquisition software," in *The Digital Forensic Research Conference*, vol. 10, Monterey, CA, 2013, pp. S30–S40.
- [12] M. Miller and J. Turkulainen, "Remote Library Injection," pp. 1–40, 2004.
- [13] B. S. Fewer, "Reflective DLL Injection," no. October, 2008.
- [14] P. Mell and T. Grance, "The NIST definition of cloud computing," *NIST Special Publication*, vol. 145, p. 7, 2011. [Online]. Available: <http://www.mendeley.com/research/the-nist-definition-about-cloud-computing/>
- [15] Linuxcontainers.org, "Linux Containers (LXC)," 2015. [Online]. Available: <https://linuxcontainers.org/lxc/introduction/>
- [16] R. Poisel, E. Malzer, and S. Tjoa, "Evidence and cloud computing: The virtual machine introspection approach," *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, vol. 4, no. 1, pp. 135–152, 2013. [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.469.937>
- [17] F. N. Dezfouli, A. Dehghantanha, R. Mahmoud, N. F. Binti Mohd Sani, and S. Bin Shamsuddin, "Volatile memory acquisition using backup for forensic investigation," *Proceedings 2012 International Conference on Cyber Security, Cyber Warfare and Digital Forensic, CyberSec 2012*, pp. 186–189, 2012.
- [18] N. L. Clarke, C. Reich, A. Saad, and S. Furnell, "Cloud Forensics : A Review of Challenges , Solutions and Open Problems Cloud Forensics : A Review of Challenges , Solutions and Open Problems," no. April, pp. 1–9, 2015.
- [19] D. Barbara, "Desafios da perícia forense em um ambiente de computação nas nuvens," Universidade do Planalto Catarinense, Tech. Rep., 2014.
- [20] B. Dolan-Gavitt, T. Leek, M. Zhivich, J. Giffin, and W. Lee, "Virtuoso: Narrowing the semantic gap in virtual machine introspection," *Proceedings - IEEE Symposium on Security and Privacy*, pp. 297–312, 2011.
- [21] A. Aljaedi, D. Lindskog, P. Zavorsky, R. Ruhl, and F. Almari, "Comparative Analysis of Volatile Memory Forensics," *IEEE International Conference on Privacy, Security, Risk and Trust (PASSAT) and IEEE International Conference on Social Computing (SocialCom)*, pp. 1253–1258, 2011.
- [22] R. B. van Baar, H. M. A. van Beek, and E. J. van Eijk, "Digital Forensics as a Service: A game changer," *Digital Investigation*, vol. 11, pp. S54–S62, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.diin.2014.03.007>
- [23] M. Rafique and M. N. A. Khan, "Exploring Static and Live Digital Forensics: Methods, Practices and Tools," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 4, no. 10, pp. 1048–1056, 2013. [Online]. Available: <http://www.ijser.org/researchpaper%5CExploring-Static-and-Live-Digital-Forensic-Methods-Practices-and-Tools.pdf>
- [24] S. Simou, C. Kalloniatis, E. Kavakli, and S. Gritzalis, "Cloud forensics: Identifying the major issues and challenges," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 8484 LNCS, pp. 271–284, 2014.
- [25] D. Bem, F. Feld, E. Huebner, and O. Bem, "Computer Forensics - Past , Present and Future," *Journal of Information Science and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 43–59, 2008.
- [26] D. Quick and K. K. R. Choo, "Impacts of increasing volume of digital forensic data: A survey and future research challenges," *Digital Investigation*, vol. 11, no. 4, pp. 273–294, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.diin.2014.09.002>