Verificação Automática de Protocolos de Segurança com a ferramenta Scyther

Tadeu Jenuario[1,3], João Otávio Chervinski[1], Giulliano Paz[2,3], Diego Kreutz[1,2,3]

[1]Laboratório de Estudos Avançados (LEA)
[2] Mestrado Profissional em Engenharia de Software (MPES)
[3] Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA)
{gnoario,joaootaviors,giulliano94}@gmail.com, kreutz@acm.org

Resumo. *Protocolos de segurança (e.g., Needham-Schroeder, Kerberos, SSH, TLS) representam o alicerce das comunicações do mundo atual. Um dos desafios de projeto destes protocolos é garantir a sua própria segurança. Atualmente, existem ferramentas desenvolvidas especificamente para a verificação formal e automática de protocolos de segurança, como a Scyther, CryptoVerif e AVISPA. Entretanto, estas ferramentas são ainda pouco conhecidas e utilizadas na prática por projetistas de protocolos e estudantes de computação. Este trabalho tem por objetivo contribuir para diminuir esta lacuna através da introdução e demonstração prática de utilização da ferramenta Scyther, desenvolvida para auxiliar na verificação automática de protocolos de segurança.*

1. Introdução

Com a popularização da Internet, a segurança das comunicações tornou-se crítica para proteger os dados das entidades comunicantes. Atualmente, os mecanismos (e.g., geração e troca de chaves) e as propriedades essenciais de segurança da informação (e.g., confidencialidade, integridade e autenticidade) são asseguradas por conjuntos de protocolos específicos, como IKE, Needham-Schroeder, Kerberos, IPSec, SSH e TLS.

Um dos maiores desafios no desenvolvimento de protocolos de segurança é garantir a corretude do próprio protocolo, desde o projeto até a implementação. Devido a isso, a verificação automática e formal de protocolos, utilizando métodos formais e matemáticos, vem tornando-se cada vez mais frequente e imprescindível na comunidade de segurança [Chudnov et al. 2018, Li et al. 2018, Kreutz et al. 2019]. Pesquisas relatam, por exemplo, que o processo de verificação formal já contribuiu também para a correção de protocolos que estavam em utilização [Dalal et al. 2010, Cremers et al. 2016, Affeldt and Marti 2013].

Atualmente, existem ferramentas desenvolvidas especificamente para auxiliar o projeto e a verificação automática de protocolos, como Scyther [Cremers 2006], AVISPA [Armando et al. 2005] e ProVerif [Blanchet et al. 2018]. No entanto, estas ferramentas ainda são pouco conhecidas e utilizadas pela comunidade. Por exemplo, analisando alguns dos principais cursos de computação do Rio Grande do Sul e as últimas três edições do WRSeg e do SBSeg, dois dos principais eventos de segurança do Brasil, não encontramos nenhum trabalho sobre verificação formal de protocolos de segurança utilizando essas ferramentas.

O objetivo deste trabalho é contribuir para a difusão do conhecimento e da importância de utilizar ferramentas de verificação automática e formal de pro-

tocolos de segurança. Neste sentido, as principais contribuições do trabalho podem ser resumidas em: (a) introdução às semânticas operacionais básicas da ferramenta Scyther; (b) descrição didática do protocolo Needham-Schroeder de chaves assimétricas [Needham and Schroeder 1978] utilizando a semântica da ferramenta; e (c) demonstração e discussão do processo de análise e correção de falhas do protocolo.

2. A Ferramenta Scyther: Semânticas Operacionais

Assim como ocorre com as demais ferramentas, a verificação automática de protocolos com a Scyther requer a utilização de uma linguagem própria [Cremers 2006]. A seguir são apresentadas algumas das principais semânticas operacionais da ferramenta, que servirão como base para o projeto e análise formal do protocolo de Needham-Schroeder (ver Seções 3 e 4).

Termos atômicos: a ferramenta Scyther manipula termos de modo que o protocolo apresente o comportamento desejado. Os termos atômicos, ou tipos específicos de dados, servem para definir os dados que serão utilizados no protocolo. Entre eles estão: o *var*, que define variáveis para armazenar os dados recebidos de uma comunicação; o *const*, que define constantes que são geradas para cada instanciação de uma função e são consideradas variáveis locais; e o *fresh*, que representa variáveis que serão iniciadas com valores pseudo-aleatórios.

Chaves assimétricas: a estrutura de chave públicas ou assimétricas é predefinida pela ferramenta, sendo $sk(X)$ correspondente a uma chave privada de X e $pk(X)$ a chave pública correspondente. Um dado ni cifrado utilizando uma chave pública (e.g., $\{ni\}pk(X)$) só poderá ser decifrado com a chave privada correspondente ($sk(X)$).

Tipos predefinidos: determinam o comportamento de uma função ou termo. Por exemplo, o tipo **Agent** é utilizado para criar um agente que irá interagir nas comunicações. **Function** é um tipo especial que define um termo como sendo uma função que pode receber uma lista de termos como parâmetro. O tipo **Nonce** é considerado o tipo padrão para termos e é utilizado para armazenar valores utilizados durante a troca de mensagens.

Tipos básicos de eventos, como **send** (enviar) e **recv** (receber), são utilizados para a comunicação entre os agentes de um protocolo (e.g., Alice e Bob). É comum que cada evento de envio possua um evento de recebimento correspondente (e.g., **send_1** e **recv_1**). Para enviar uma mensagem de Alice para Bob, contendo o dado ni cifrado com a chave pública de Bob, basta utilizar a sintaxe $send_1(Alice, Bob, \{ni\}pk(Bob))$. Para receber a mensagem enviada de Alice para Bob, basta utilizar a sintaxe $recv_1(Alice, Bob, \{ni\}pk(Bob))$. Bob irá receber a mensagem de Alice e utilizar a sua chave privada correspondente para decifrar o dado contido na variável ni.

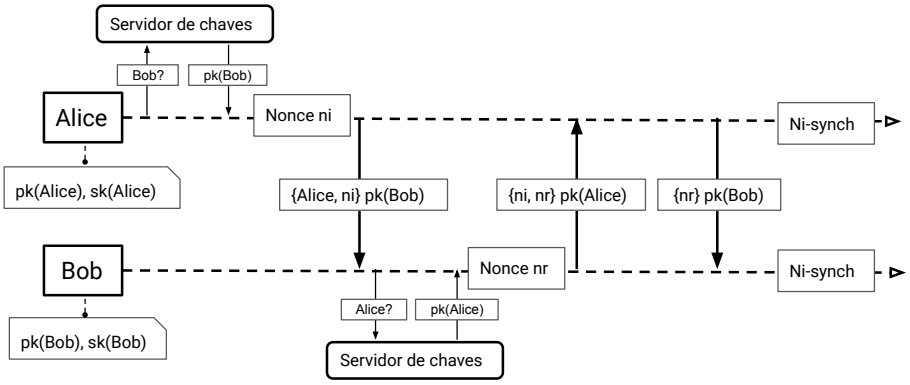
Eventos de afirmação (*claim*) são utilizados em especificações de funções para modelar propriedades de segurança. Na prática, após afirmar que uma variável é secreta, a ferramenta irá verificar se a afirmação procede durante a execução do protocolo, i.e., verificar se somente as partes comunicantes possuem acesso ao dado secreto. Por exemplo, para afirmar que uma variável ni é secreta, utiliza-se o termo **Secret** dentro de um evento de afirmação, i.e., $claim(Bob, Secret, ni)$. Também pode-se utilizar o termo **Nisynch** dentro de um evento de afirmação, i.e., $claim(Bob, Nisynch)$ para verificar se todas as mensagens recebidas pelo receptor foram de fato enviadas pelo parceiro de comunicação e não por um agente desconhecido.

3. O Protocolo Needham-Schroeder

O protocolo Needham-Schroeder fornece um método de autenticação para dois participantes em uma rede insegura utilizando criptografia assimétrica [Needham and Schroeder 1978]. Entretanto, o protocolo original apresenta falhas de segurança [Lowe 1995]. O objetivo é demonstrar e corrigir as falhas de segurança do protocolo utilizando a ferramenta Scyther.

A Figura 1 apresenta um diagrama da comunicação entre Alice e Bob utilizando o protocolo Needham-Schroeder. É assumido que cada usuário possui a chave privada e a chave pública do seu par. Alice deseja comunicar-se com Bob e, para tanto, requisita ao servidor de chaves a chave pública do Bob. Na sequência, Alice gera e envia para Bob um *nonce* ni juntamente com sua identificação. A mensagem é cifrada com a chave pública do Bob. Ao receber a mensagem, Bob decodifica-a e recupera o *nonce* ni e a identificação da remetente. Bob lê a identificação de Alice e requisita a respectiva chave pública para o servidor de chaves. No próximo passo, Bob gera e envia para Alice um novo *nonce* nr, criptografado com a chave pública da receptora. Ao receber a mensagem, Alice verifica que o *nonce* ni recebido é o mesmo que foi enviado para Bob anteriormente. Finalmente, Alice então envia para Bob o *nonce* nr. Ao receber e verificar os respectivos *nonces*, utilizando as respectivas chaves privadas, Alice e Bob são capazes de confirmar a autenticidade das mensagens.

Figura 1. Alice e Bob utilizando o protocolo Needham-Schroeder



O Algoritmo 1 apresenta o protocolo Needham-Schroeder na semântica do Scyther. As chaves públicas pk e privadas sk são declaradas globalmente (linhas 1 e 2), embora sejam atribuídas autonomamente a Alice e Bob pela ferramenta. O comando *inversekeys* (linha 3) determina que as chaves pk e sk são inversas, ou seja, ao cifrar com a chave pública só é possível decifrar com a chave secreta e vice-versa. Para a execução de ataques ao protocolo, é definido um agente não-confiável *Eve* (linhas 5 e 6).

A chamada à função **protocol** (linha 6) marca o início da especificação do protocolo ns, com três agentes (Alice, Bob e Eve), sendo que Alice e Bob possuem papéis (**role**) explícitos. A variável ni (linha 8), do tipo **Nonce** e antecedida por **fresh**, irá conter um valor pseudo-aleatório (e.g., linha 10). Já a variável nr (linha 9), do mesmo tipo, mas **var** ao invés de **fresh**, é utilizada para armazenar valores recebidos (e.g., linha 11).

Cada evento de envio (**send_1**) possui um evento de recebimento (**recv_1**) cor-

Algoritmo 1: Algoritmo Needham-Schroeder na semântica da Scyther

```
1  const pk: Function;
2  secret sk: Function;
3  inversekeys (pk,sk);
4  const Eve: Agent;
5  untrusted Eve;
6  protocol ns(Alice,Bob,Eve){
7     role Alice{
8        fresh ni: Nonce;
9        var nr: Nonce;
10       send_1(Alice,Bob,{Alice,ni}pk(Bob));
11       recv_2(Bob,Alice,{ni,nr}pk(Alice));
12       send_3(Alice,Bob,{nr}pk(Bob));
13       claim(Alice,Secret,ni);
14       claim(Alice,Secret,nr);
15       claim(Alice,Nisynch);
16    }
17    role Bob{
18       var ni: Nonce;
19       fresh nr: Nonce;
20       recv_1(Alice,Bob,{Alice,ni}pk(Bob));
21       send_2(Bob,Alice,{ni,nr}pk(Alice));
22       recv_3(Alice,Bob,{nr}pk(Bob));
23       claim(Bob,Secret,ni);
24       claim(Bob,Secret,nr);
25       claim(Bob,Nisynch);
26    }
27 }
```

respondente (e.g., linhas 10 e 20). A sintaxe do evento **send_1** (linha 10) indica que a transmissão é de Alice para Bob, os dados enviados, cifrados com a chave pública do Bob $pk(Bob)$, são "*Alice*"e ni. No agente Bob (linha 20), há um evento com sintaxe idêntica, cuja única diferença é o tipo, i.e., **recv** ao invés de **send**. Na sequência, Bob envia os valores ni e nr para Alice (linha 21). Alice recebe a resposta (linha 11), verificar o valor do ni e envia nr para Bob (linha 12), que recebe e verifica o valor (linha 22).

Finalmente, as afirmações **claim** (linhas 13, 14, 15 23, 24, 25) definem os requisitos de segurança do protocolo. No caso, as afirmações criadas verificam se os *nonces* gerados por Alice (ni) e Bob (nr) permanecem secretos durante as comunicações (claim **Secret**) e se as mensagens são de fato trocadas entre eles apenas (claim **Nisynch**).

4. Análise do Protocolo com a Ferramenta Scyther

Ao analisar o código do Algoritmo 1 na ferramenta Scyther, é gerado um relatório que aponta a existência de falhas no protocolo, como pode ser visto na Figura 2a. Na coluna **Claim** são apresentadas quatro informações, o protocolo testado (*ns*), os agentes analisados (Alice e Bob), um par de valores que servem como um identificador único para cada evento (e.g., $ns, Alice1$) e o evento de afirmação (e.g., $Secret\ ni$). Nas colunas **Status**, **Comments** e **Patterns** são reportados os eventuais ataques que o protocolo é suscetível. Como pode ser observado, há pelo menos um ataque no protocolo Needham-Schroeder, que afeta os eventos $ns, Bob1$ e $ns, Bob2$. Nestes casos, a ferramenta gera também um grafo com os passos de execução do(s) ataque(s), como ilustrado na Figura 3.

Para comprometer a comunicação entre Alice e Bob, Eve (agente malicioso) precisa apenas convencer Alice de que é Bob. Alice envia a Eve uma mensagem $\{Alice, ni\}$ cifrada com a chave pública $pkEve$. Como Eve possui a chave privada correspondente, ele consegue ler o conteúdo da mensagem. Eve então cifra e envia a mensagem para Bob. Bob, sem desconfiar, pois recebeu uma mensagem cifrada com sua chave pública, responde ao atacante com a mensagem $\{ni, nr\}pkAlice$. O agente malicioso simplesmente encaminha a mensagem para Alice. Para confirmar o recebimento do $nonce\ nr$, Alice responde ao atacante com $\{nr\}pkEve$. O atacante decifra a mensagem, descobre o valor de nr, cifra e envia a mensagem para Bob. Bob confirma o valor de nr (autenticação)

Scyther results : verify

Claim				Status		Comments	Patterns
ns3	Alice	ns3,Alice1	Secret ni	Ok	Verified	No attacks.	
		ns3,Alice2	Secret nr	Ok	Verified	No attacks.	
		ns3,Alice3	Nisynch	Ok	Verified	No attacks.	
	Bob	ns3,Bob1	Secret ni	Fail	Falsified	At least 1 attack.	1 attack
		ns3,Bob2	Secret nr	Fail	Falsified	At least 1 attack.	1 attack
		ns3,Bob3	Nisynch	Fail	Falsified	At least 1 attack.	1 attack

Done.

(a) **Verificação do protocolo Needham-Schroeder**

Scyther results : verify

Claim				Status		Comments
ns3	Alice	ns3,Alice1	Secret ni	Ok	Verified	No attacks.
		ns3,Alice2	Secret nr	Ok	Verified	No attacks.
		ns3,Alice3	Nisynch	Ok	Verified	No attacks.
	Bob	ns3,Bob1	Secret ni	Ok	Verified	No attacks.
		ns3,Bob2	Secret nr	Ok	Verified	No attacks.
		ns3,Bob3	Nisynch	Ok	Verified	No attacks.

Done.

(b) **Verificação do protocolo corrigido**

Scyther results : verify

Claim				Status		Comments	Patterns
ns3	Alice	ns3,Alice1	Secret ni	Fail	Falsified	At least 1 attack.	1 attack
		ns3,Alice2	Secret nr	Fail	Falsified	At least 1 attack.	1 attack
		ns3,Alice3	Nisynch	Fail	Falsified	At least 1 attack.	1 attack
	Bob	ns3,Bob1	Secret ni	Fail	Falsified	At least 1 attack.	1 attack
		ns3,Bob2	Secret nr	Fail	Falsified	At least 1 attack.	1 attack
		ns3,Bob3	Nisynch	Fail	Falsified	At least 1 attack.	1 attack

Done.

(c) **Comprometimento da chave secreta**

Figura 2. Resultados gerados pela ferramenta Scyther.

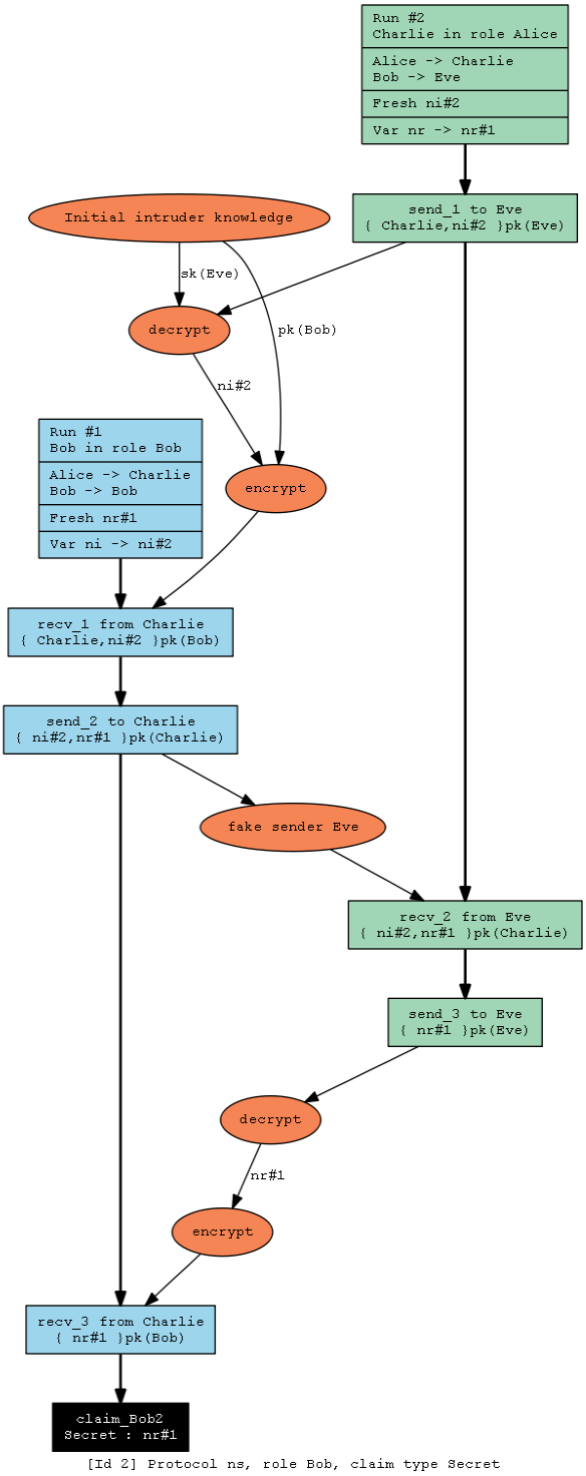


Figura 3. Diagrama do ataque ao protocolo gerado automaticamente pela ferramenta.

e acredita que está comunicando-se com Alice. A partir deste ponto, todas as mensagens trocadas entre Alice e Bob passam primeiro pelo atacante. Observem que o ataque é

simples. Eve precisa apenas estar entre Alice e Bob e conhecer a chave pública de Bob.

Para corrigir esta falha do protocolo, Bob deve adicionar a sua identidade na resposta à primeira mensagem de Alice (ni, nr, Bob na linha 20 do Algoritmo 1). Com isto, Alice consegue descobrir que a identidade contida na mensagem é diferente da identidade de Eve, para quem está enviando as suas mensagens. Neste caso, Alice simplesmente encerra a troca de mensagens. Com o algoritmo corrigido (linha 20), o resultado da análise da Scyther pode ser visto na Figura 2b. Como pode ser observado, um simples detalhe de especificação pode comprometer toda a segurança do protocolo. Isto demonstra o quão importante é a utilização de ferramentas de verificação automática de protocolos.

Para observar o que ocorre no protocolo, é possível definir um agente não-confiável Eve ("$compromised\ sk(Eve);$"), capaz de comprometer as chaves privadas dos demais agentes. Tomando como exemplo o Algoritmo 1, a ferramenta considera a existência de um agente malicioso que conhece as chaves secretas de Alice e Bob. Isto permite que o atacante comprometa as comunicações, conforme a Figura 2c.

5. Conclusão

Este trabalho apresentou uma introdução à ferramenta de verificação automática de protocolos Scyther, utilizando como exemplo o protocolo Needham-Schroeder. Este protocolo possui uma falha de segurança grave, que pode ser facilmente detectada e corrigida com a utilização da Scyther. Este exemplo prático real, destaca a importância da disseminação do conhecimento e da utilização de ferramentas de verificação formal de protocolos.

Referências

Affeldt, R. and Marti, N. (2013). Towards Formal Verification of TLS Network Packet Processing Written in C. In *7th PLPV*, pages 35–46. ACM.

Armando, A., Basin, D., Boichut, Y., Chevalier, Y., Compagna, L., Cuéllar, J., Drielsma, P. H., Héam, P.-C., Kouchnarenko, O., Mantovani, J., et al. (2005). The AVISPA tool for the automated validation of internet security protocols and applications. In *International conference on computer aided verification*, pages 281–285. Springer.

Blanchet, B., Smyth, B., Cheval, V., and Sylvestre, M. (2018). ProVerif 2.00: Automatic Cryptographic Protocol Verifier, User Manual and Tutorial. `https://bit.ly/2OUlH7f`.

Chudnov, A., Collins, N., Cook, B., Dodds, J., Huffman, B., MacCárthaigh, C., Magill, S., Mertens, E., Mullen, E., Tasiran, S., Tomb, A., and Westbrook, E. (2018). Continuous Formal Verification of Amazon s2n. In *Computer Aided Verification*, pages 430–446.

Cremers, C., Horvat, M., Scott, S., and v. d. Merwe, T. (2016). Automated Analysis and Verification of TLS 1.3: 0-RTT, Resumption and Delayed Authentication. In *IEEE SP*.

Cremers, C. J. F. (2006). *Scyther: Semantics and verification of security protocols*. Eindhoven University of Technology Eindhoven.

Dalal, N., Shah, J., Hisaria, K., and Jinwala, D. (2010). A comparative analysis of tools for verification of security protocols. *Int. J. of Comm., Network and System Sciences*, 3(10):779.

Kreutz, D., Yu, J., Ramos, F. M. V., and Esteves-Verissimo, P. (2019). ANCHOR: Logically centralized security for software-defined networks. *ACM Trans. Priv. Secur.*, 22(2):8:1–8:36.

Li, L., Sun, J., Liu, Y., Sun, M., and Dong, J. (2018). A Formal Specification and Verification Framework for Timed Security Protocols. *IEEE Trans. on Soft. Engineering*, 44(8):725–746.

Lowe, G. (1995). An Attack on the Needham- Schroeder Public- Key Authentication Protocol. *Information processing letters*, 56(3).

Needham, R. M. and Schroeder, M. D. (1978). Using encryption for authentication in large networks of computers. *Communications of the ACM*, 21(12):993–999.