

# Lyra2

*Password Hashing Scheme with improved security  
against time-memory trade-offs (TMTO)*

**Ewerton R. Andrade**

eandrade@larc.usp.br

**Orientador: Marcos A. Simplicio Jr**

mjunior@larc.usp.br

Escola Politécnica – Poli  
Universidade de São Paulo – USP

*Agências de fomento:*

CAPES, FDTE e Erasmus Mundus

IV Concurso de Teses e Dissertações em Segurança

07 de novembro de 2016

# Agenda

- 1 Introdução
  - Motivação
  - Objetivos
- 2 Lyra2
  - *The Bootstrapping phase*
  - *The Setup phase*
  - *The Wandering phase*
  - *The Wrap-up phase*
- 3 Lyra2 x scrypt x finalistas do PHC
  - Segurança
  - Desempenho
- 4 Considerações Finais
  - Principais Resultados
  - Trabalhos Futuros
  - Agradecimentos

# Agenda

- 1 Introdução
  - Motivação
  - Objetivos
- 2 Lyra2
  - *The Bootstrapping phase*
  - *The Setup phase*
  - *The Wandering phase*
  - *The Wrap-up phase*
- 3 Lyra2 x *script* x finalistas do PHC
  - Segurança
  - Desempenho
- 4 Considerações Finais
  - Principais Resultados
  - Trabalhos Futuros
  - Agradecimentos




# Motivação

A **autenticação é vital** para a segurança dos sistemas computacionais modernos



# Motivação

A **autenticação é vital** para a segurança dos sistemas computacionais modernos

KNOW	HAVE	ARE
		
Passwords ID Questions Secret Images	Token (Smart) Card Phone	Face Iris Hand/Finger

# Motivação (Cont.)

A maioria dos usuários escolhe senhas com uma **entropia relativamente baixa** (aproximadamente 40.5 bits [FH07])

Facilitando a execução de ataques de “força-bruta”:

- Dicionário
- Busca exaustiva
- Tabelas pré-calculadas (*Rainbow tables*, tabelas de hashes, ...)

# Motivação (Cont.)

A maioria dos usuários escolhe senhas com uma **entropia relativamente baixa** (aproximadamente 40.5 bits [FH07])

Facilitando a execução de ataques de “força-bruta”:

- Dicionário
- Busca exaustiva
- Tabelas pré-calculadas (*Rainbow tables*, tabelas de hashes, ...)

Como aumentar o custo destes ataques?

Empregando **Esquemas de Hash de Senhas (PHS)**:

PBKDF2  
bcrypt  
scrypt  
Lyra



# Objetivo Geral

- 
- Projetar e analisar uma **melhor alternativa** aos algoritmos existentes atualmente



# Objetivos Específicos

## Manutenção

Manter a eficiência e flexibilidade do Lyra, o que inclui:

- A capacidade de **configurar a quantidade de memória e o tempo** de processamento utilizados pelo algoritmo (*flexibilidade*)
- A capacidade de **utilizar mais memória** para um tempo de processamento similar ao do scrypt (*eficiência*)

# Objetivos Específicos

## Manutenção

Manter a eficiência e flexibilidade do Lyra, o que inclui:

- A capacidade de **configurar a quantidade de memória e o tempo** de processamento utilizados pelo algoritmo (*flexibilidade*)
- A capacidade de **utilizar mais memória** para um tempo de processamento similar ao do scrypt (*eficiência*)

## Melhoria (*segurança*)

Em comparação ao seu predecessor, o Lyra2 adiciona:

- Melhorias no nível de segurança contra ataques que substituam memória por tempo de processamento (**TMTO** – *time-memory trade-offs*)
- Ajustes que aumentam o custo envolvido na **construção de um hardware** dedicado para atacar o algoritmo
- Equilíbrio entre ataques de **canal colateral** (*side-channel*) e ataques que se baseiam no uso de dispositivos de **memória mais barata** (e, consequentemente, mais lenta)

# Agenda

- 1 Introdução
  - Motivação
  - Objetivos
- 2 Lyra2
  - *The Bootstrapping phase*
  - *The Setup phase*
  - *The Wandering phase*
  - *The Wrap-up phase*
- 3 Lyra2 x <sup>\*</sup>script x finalistas do PHC
  - Segurança
  - Desempenho
- 4 Considerações Finais
  - Principais Resultados
  - Trabalhos Futuros
  - Agradecimentos

# Visão geral (*Esponjas criptográficas*)

- Construído sobre a estrutura de **Esponjas criptográficas**

Por que?

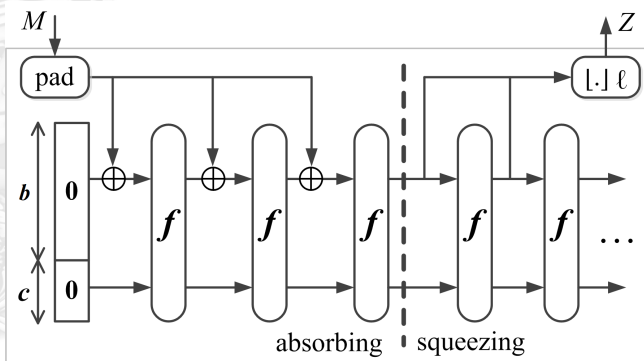
Elegância, Flexibilidade, **Segurança**

# Visão geral (*Esponjas criptográficas*)

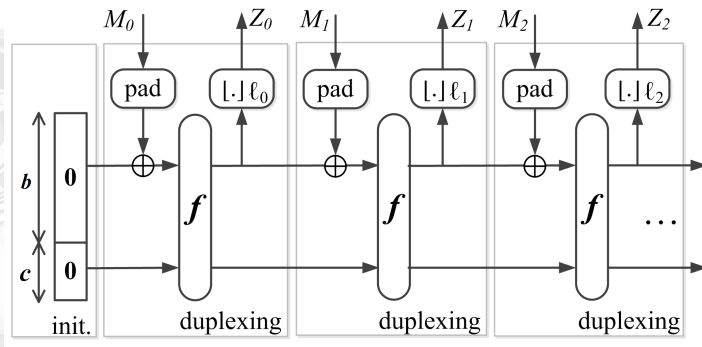
- Construído sobre a estrutura de **Esponjas criptográficas**

Por que?

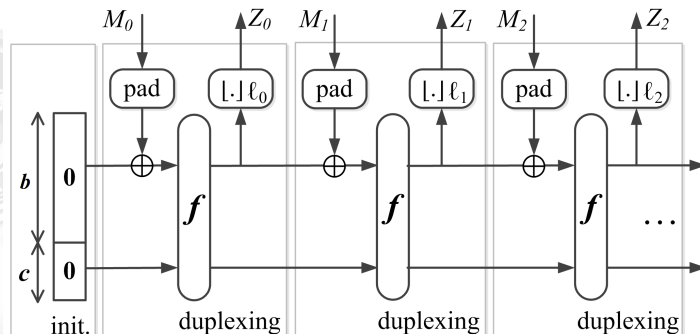
Elegância, Flexibilidade, **Segurança**



# Visão geral (*Esponjas criptográficas*)



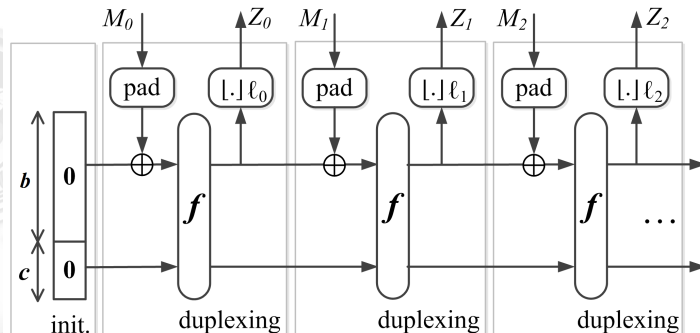
# Visão geral (*Esponjas criptográficas*)



## Instâncias

- Keccak (SHA-3), Quark, Photon, Spongent, Gluon ... [BDPA07]

# Visão geral (*Esponjas criptográficas*)



## Instâncias

- Keccak (SHA-3), Quark, Photon, Spongint, Gluon ... [BDPA07]

## PHC special recognition

“pelo design elegante, baseado em esponjas criptográficas” [PHC15]



# Visão geral (Lyra2)

- Baseado em quatro fases
  - **Bootstrapping**: Inicializa a esponja e as variáveis utilizadas pelo algoritmo
  - **Setup**: Inicializa a matriz de memória
  - **Wandering**: Visita e reescreve a matriz de memória iterativamente
  - **Wrap-up**: Provê a saída

# The Bootstrapping phase

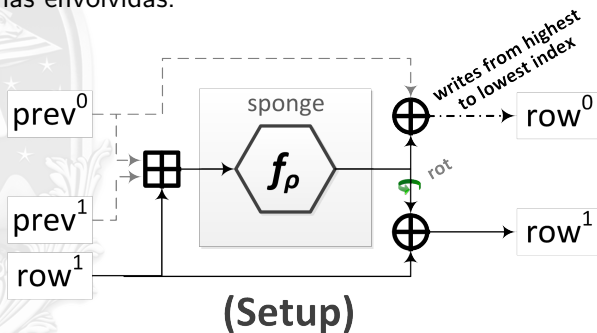
Inicializa a esponja e as variáveis utilizadas pelo algoritmo

- Absorve (operação *absorb*): *pwd*, *salt*, e *parameters*
- Inicializa demais variáveis (*contadores*)

# The Setup phase

## Inicializa a matriz de memória

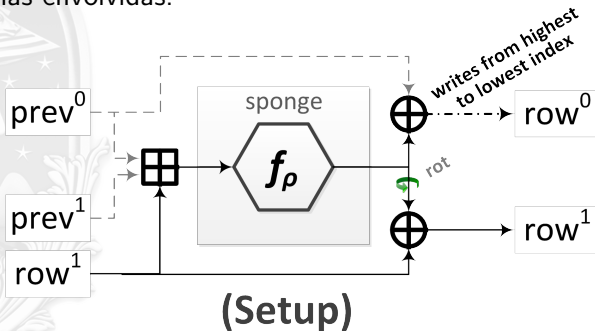
- Determinística (i.e., *protege de ataques por canal colateral*)
- Linhas envolvidas:



# The Setup phase

## Inicializa a matriz de memória

- Determinística (*i.e.*, *protege de ataques por canal colateral*)
- Linhas envolvidas:

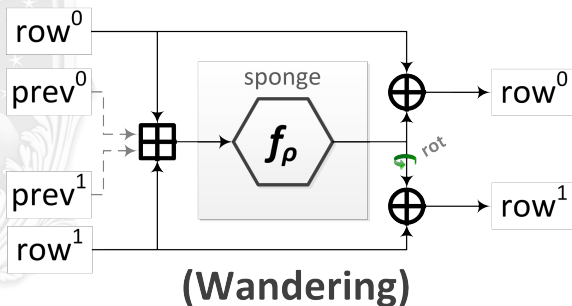


- Dificulta o **pipelining**, e aumenta a **latência em hardware** (*em ataques*)

# The Wandering phase

Visita e reescreve a matriz de memória iterativamente

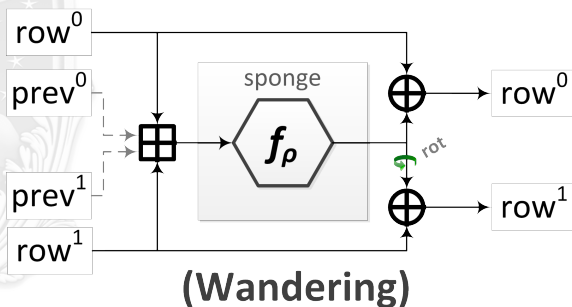
- Natureza pseudo-aleatória (*aumento o TMT0*)
- As colunas também são selecionadas pseudo-aleatoriamente (*diminui o desempenho: GPUs e plat. com cache pequeno*)
- Linhas envolvidas:



# The Wandering phase

Visita e reescreve a matriz de memória iterativamente

- Natureza pseudo-aleatória (*aumento o TMTO*)
- As colunas também são selecionadas pseudo-aleatoriamente (*diminui o desempenho: GPUs e plat. com cache pequeno*)
- Linhas envolvidas:




- Prioriza **plat. legítimas**, e aumenta o **custo de hardwares dedicados**

# The Wrap-up phase

## Provê a saída

- Provê como saída uma cadeia de bits de tamanho  $k$  (*squeeze*)

# Agenda

- 
- 1 Introdução
    - Motivação
    - Objetivos
  - 2 Lyra2
    - *The Bootstrapping phase*
    - *The Setup phase*
    - *The Wandering phase*
    - *The Wrap-up phase*
  - 3 Lyra2 x scrypt x finalistas do PHC
    - Segurança
    - Desempenho
  - 4 Considerações Finais
    - Principais Resultados
    - Trabalhos Futuros
    - Agradecimentos



# Low-Memory attack/TMTO

- Quando a memória utilizada pelo atacante for **menor do que a metade** (i.e.,  $\frac{R}{2^{n+2}}$ , onde  $n \geq 0$ )
- A “árvore de dependência” cresce significativamente, resultando em uma **complexidade aproximada de:**

$$O(2^{2nT} R^{2+n/2}), \text{ para } n \gg 1$$

# Low-Memory attack/TMTO

- Quando a memória utilizada pelo atacante for **menor do que a metade** (i.e.,  $\frac{R}{2^{n+2}}$ , onde  $n \geq 0$ )
- A “árvore de dependência” cresce significativamente, resultando em uma **complexidade aproximada de:**

$$O(2^{2nT} R^{2+n/2}), \text{ para } n \gg 1$$

- Outras análises de TMTO se mostraram **menos vantajosas** dependendo da configuração

# Slow-Memory and Cache-timing attacks



**Slow-Memory**

**X**



**Cache-timing**  
*(side-channel)*

# Slow-Memory and Cache-timing attacks



**Slow-Memory**

X



**Cache-timing**  
(side-channel)

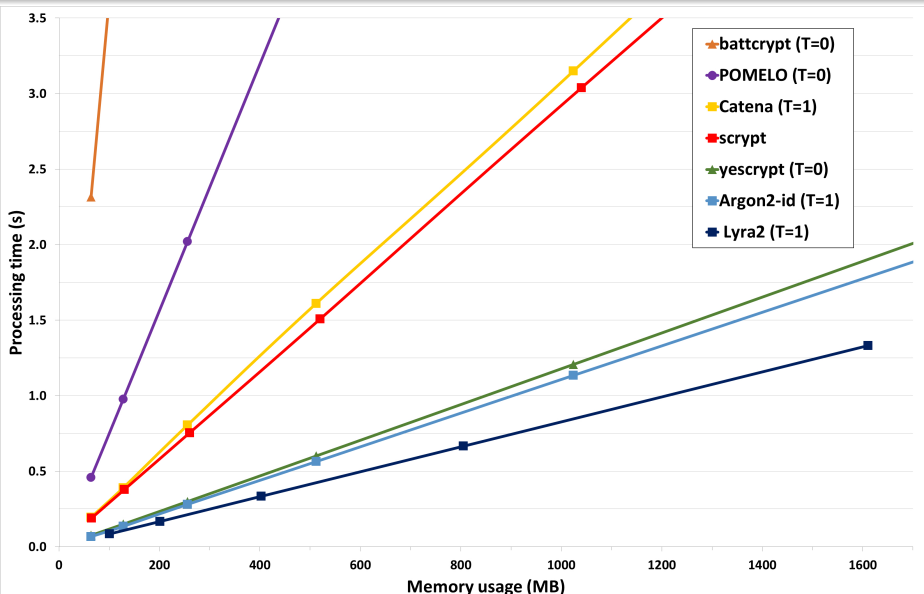
PHC special recognition

“abordagem alternativa para resistir a ataques por canal colateral” [PHC15]


Algoritmo	TMT0	SM	SC	Hw/GPUs	GC
Argon2i [BDK16]	for $R' = R/6$ $\approx 2^{15.5} \cdot T \cdot R$	—	✓	✓	✓
Argon2d [BDK16]	for $R' = R/6$ $\approx 2^{19.6} \cdot T \cdot R$	✓	✗	✓	✓
battcrypt [Tho14]	—	✓	✗	✓	✓
Catena [FLW13]	$O(1)$ $\Theta(R^{T+1})$	—	✓	✓	✓
Lyra	$O(1)$ $O(R^{T+1})$	✓	✗	✓	✓
Lyra2 [nosso]	Para $R' = R/2^{n+2}$ , onde $n \geq 0$ $O(2^{2nT} R^{2+n/2})$ , para $n \gg 1$	✓	!	✓	✓
POMELO [Wu15]	—	✓	!	✓	✓
yescrypt [Pes15]	$O(1)$ $O(R^{T+1})$	✓	✗	✓	✓*
script [Per09]	$O(1)$ $O(R^2)$	✓	✗	!	✗

✓ - Possui proteção; ✗ - Não possui proteção; ! - Proteção parcial; — - Nada declarado.

# Desempenho (*parâmetros mínimos*)



# Agenda

- 
- 1 Introdução
    - Motivação
    - Objetivos
  - 2 Lyra2
    - *The Bootstrapping phase*
    - *The Setup phase*
    - *The Wandering phase*
    - *The Wrap-up phase*
  - 3 Lyra2 x *script* x finalistas do PHC
    - Segurança
    - Desempenho
  - 4 Considerações Finais
    - Principais Resultados
    - Trabalhos Futuros
    - Agradecimentos

# Resultados

- Neste trabalho apresentamos um **novo Esquema de Hash de Senhas** que:
  - É melhor do que as soluções pré-PHC
  - Contribuiu significativamente para o amadurecimento das soluções apresentadas no PHC
- **Mantêm a eficiência e a flexibilidade** do seu predecessor, e ainda **aumenta sua segurança** em termos de:
  - TMTO
  - Custos envolvidos na construção de um hardware dedicado
  - Equilíbrio entre ataques de canal colateral e ataque que se baseiam no uso de dispositivos de memória mais barata



# Publicações, adoções e demais contribuições

## PHC special recognition [PHC15]

### Adoções

- Vertcoin migrou do scrypt para o Lyra2 [a4314, Day14]
- O Sgminer adicionou o Lyra2 em suas distribuições [Cry15]
- O Argon2 adotou o BlaMka como padrão [BDK16]

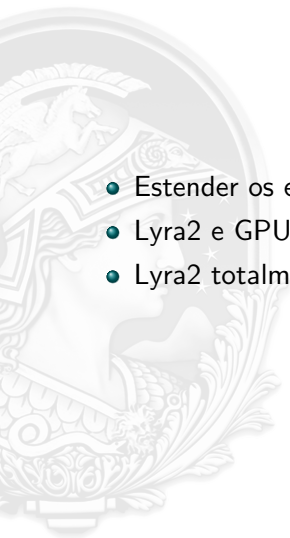
### Publicações

- Lyra publicado no JCEN [AABS14]
- Lyra2 aceito no IEEE trans. on Computers [ASBS16]
- Resumo do Lyra2 apresentado no 3º WPG-EC, na LatinCrypt'14 e na ICISSP'16 [AS14b, AS14a, AS16]


### Prêmio

- Melhor trabalho de doutorado [AS16, ICI16]

# Trabalhos Futuros

- 
- Estender os estudos do BlaMka
  - Lyra2 e GPUs (*friendly e unfriendly*)
  - Lyra2 totalmente resistente a ataques por canal colateral

# Agradecimentos

- 
- **CAPES, FDTE, FUSP e Erasmus Mundus**
    - *Pelo auxílio financeiro*
  - **LARC**
    - *Por proporcionar o ambiente adequado para o desenvolvimento deste trabalho*



Obrigado!

# Referências

- [a4314] a432511. PoW Algorithm Upgrade: Lyra2 – Vertcoin.  
<https://vertcoin.org/pow-algorithm-upgrade-lyra2/>. Accessed: 2015-05-06., 2014.
- [AABS14] L. C. Almeida, E. R. Andrade, P. S. L. M. Barreto e M. A. Simplicio Jr. Lyra: Password-Based Key Derivation with Tunable Memory and Processing Costs. *Journal of Cryptographic Engineering*, 4(2):75–89, 2014. See also <http://eprint.iacr.org/2014/030>.
- [AS14a] E. R. Andrade e M. A. Simplicio Jr. Lyra2: a password hashing schemes with tunable memory and processing costs. Third International Conference on Cryptology and Information Security in Latin America, LATINCRYPT'14. Florianópolis, Brazil. <http://latincrypt2014.labsec.ufsc.br/>, 2014.
- [AS14b] E. R. Andrade e M. A. Simplicio Jr. Lyra2: Um Esquema de Hash de Senhas com custos de memória e processamento ajustáveis, October 2014.
- [AS16] E. R. Andrade e M. A. Simplicio Jr. Lyra2: Efficient Password Hashing with high security against Time-Memory Trade-Offs. Em *Doctoral Consortium – Proceedings of 2nd International Conference on Information Systems Security and Privacy, ICISSP 2016, Rome, Italy, February 2016*. Institute for Systems and Technologies of Information, INSTICC. <http://www.icissp.org/?y=2016>.
- [ASBS16] E. R. Andrade, M. A. Simplicio Jr, P. S. L. M. Barreto e P. C. F. dos Santos. Lyra2: efficient password hashing with high security against time-memory trade-offs. *IEEE Transactions on Computers*, PP(99), 2016. See also <http://eprint.iacr.org/2015/136>.
- [BDK16] A. Biryukov, D. Dinu e D. Khovratovich. Argon2: the memory-hard function for password hashing and other applications. *Password Hashing Competition, Luxembourg, v1.3 of argon2 edição, Feb 2016*.  
<https://github.com/P-H-C/phc-winner-argon2/blob/master/argon2-specs.pdf>.
- [BDPA07] G. Bertoni, J. Daemen, M. Peeters e G. Van Assche. Sponge functions. (ECRYPT Hash Function Workshop 2007), 2007. <http://sponge.noekeon.org/SpongeFunctions.pdf>. Accessed: 2015-06-09.
- [Cry15] Crypto Mining. Updated Windows Binary of sgminer 5.1.1 With Fixed Lyra2Re Support – Crypto Mining Blog. <http://cryptomining-blog.com/4535-updated-windows-binary-of-sgminer-5-1-1-with-fixed-lyra2re-support/>, 2015.

# Referências II

- [Day14] Timothy Day. Vertcoin (VTC) plans algorithm change to Lyra2 – coinbrief. <http://coinbrief.net/vertcoin-algorithm-change-lyra2/>. Accessed: 2015-05-06, 2014.
- [FH07] D. Florencio e C. Herley. A Large-scale Study of Web Password Habits. Em Proceedings of the 16th International Conference on World Wide Web, páginas 657–666, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [FLW13] C. Forler, S. Lucks e J. Wenzel. Catena: A Memory-Consuming Password Scrambler. Cryptology ePrint Archive, Report 2013/525, 2013. <http://eprint.iacr.org/2013/525>. Accessed: 2014-03-03.
- [ICI16] ICISSP. Previous awards. International Conference on Information Systems Security and Privacy – website, 2016. <http://www.icissp.org/PreviousAwards.aspx>.
- [Per09] C. Percival. Stronger key derivation via sequential memory-hard functions. Em BSDCan 2009 – The Technical BSD Conference, Ottawa, Canada, 2009. University of Ottawa. See also: [http://www.bsdcn.org/2009/schedule/attachments/87\\_script.pdf](http://www.bsdcn.org/2009/schedule/attachments/87_script.pdf). Accessed: 2013-12-09.
- [Pes15] A. Peslyak. yescrypt - a Password Hashing Competition submission. Password Hashing Competition, Moscow, Russia, v1 edição, Jan 2015. <https://password-hashing.net/submissions/specs/yescrypt-v0.pdf>. Accessed: 2015-05-22.
- [PHC15] PHC. Password Hashing Competition. <https://password-hashing.net/#phc>, 2015.
- [SO12] D. Song e J. Oberheide. Modern Two-Factor Authentication: Defending Against User-Targeted Attacks. Duo Security, 2012. <https://speakerdeck.com/duosec/modern-two-factor-authentication-defending-against-user-targeted-attacks>.
- [Tho14] S. Thomas. battcrypt (Blowfish All The Things). Password Hashing Competition, Lisle, IL, USA, v0 edição, Mar 2014. <https://password-hashing.net/submissions/specs/battcrypt-v0.pdf>.
- [Wu15] H. Wu. POMELO – A Password Hashing Algorithm (Version 2). Password Hashing Competition, Nanyang Ave, Singapore, v3 edição, Apr 2015. <https://password-hashing.net/submissions/specs/POMELO-v3.pdf>.

# Créditos

- A imagem utilizada como plano de fundo em todos os slides segue a licença de uso que consta em <http://www.poli.usp.br> – © Escola Politécnica da USP.
- A imagem utilizada no slide de Motivação foi retirada de [SO12] e segue a licença de uso © GitHub Inc.
- A imagem utilizada no slide de Motivação (*Cont.*) foi adaptada de imagens dos sites: <http://1aled.fotomaps.ru/> e <http://www.harvestsolutions.net/>, seguindo suas respectivas licenças de uso.
- A imagem utilizada no slide de Metodologia foi retirada do site <http://corneralliance.com/> e segue a licença de uso que consta no respectivo site.
- As imagens utilizadas no slide *Slow-Memory and Cache-timing attacks* foram retiradas dos sites <http://www.toshiba.com/>, <http://www.engadget.com/> e <https://wiki.teamfortress.com/>; e seguem as licenças de uso que constam nos respectivos sites.
- As demais imagens utilizadas ao longo desta apresentação foram confeccionadas pelos autores.