Otimização de desempenho do esquema de assinatura digital Winternitz

Gustavo Zambonin

Universidade Federal de Santa Catarina
Departmento de Informática e Estatística

gustavo.zambonin@grad.ufsc.br

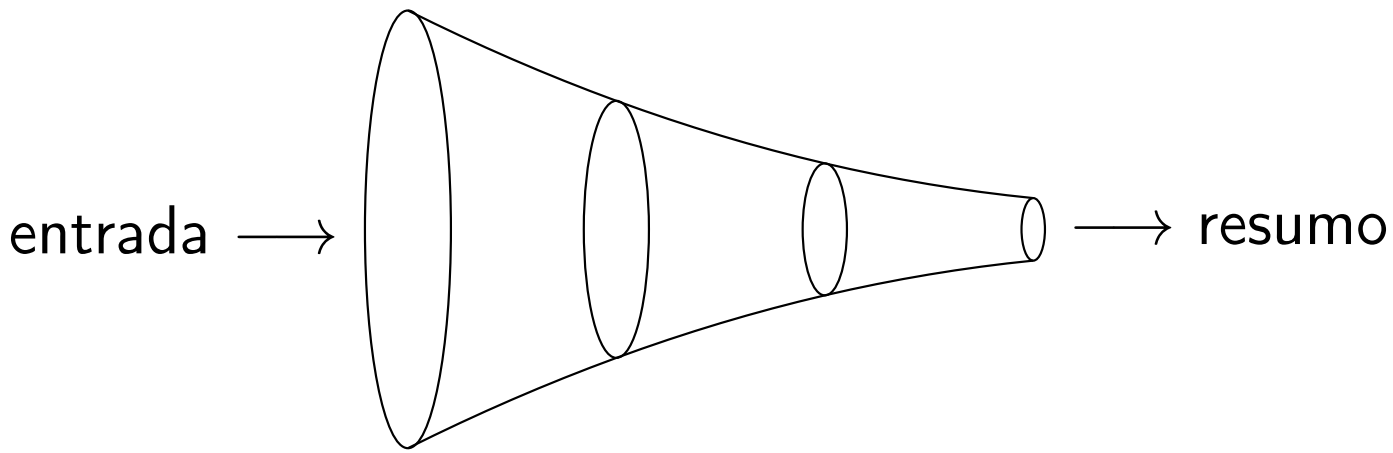
Motivação

- Segurança de esquemas de assinatura digital baseada em problemas da teoria de números
  - Insuficiente no âmbito de algoritmos quânticos
  - Criptografia pós-quântica é independente destes problemas
- Funções de mão única são necessárias e suficientes para assinatura digital [Rom90]
  - Base teórica de funções de resumo criptográfico
  - Construção de esquemas baseados apenas nestas funçõess

Primitivas criptográficas

Função de resumo criptográfico

$$\mathcal{H} : \{0,1\}^* \longrightarrow \{0,1\}^n$$

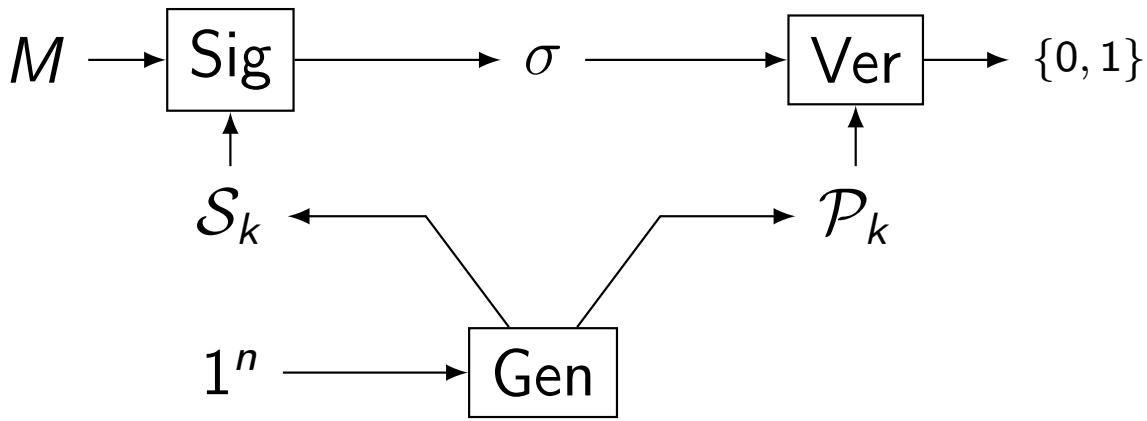


- SHA-2, SHA-3, BLAKE: $n \in \{224, 256, 384, 512\}$
- Keccak: qualquer n
- Resistência à pré-imagem, segunda pré-imagem, colisões

Primitivas criptográficas

Assinatura digital

- Provê autenticação, integridade e não-repúdio
- Baseada em criptografia de chaves públicas
- Tripla de algoritmos probabilísticos de tempo polinomial [Gol04]



- Existem esquemas onde o par de chaves é de uso único

Esquema de assinatura única Winternitz

Etapa de geração de chaves

Tome uma mensagem M, $w \in \mathbb{N}, w > 1$, $f : \{0,1\}^n \longrightarrow \{0,1\}^n$ e $\mathcal{H} : \{0,1\}^* \longrightarrow \{0,1\}^n$. Então,

$$t_1 = \left\lceil \frac{n}{w} \right\rceil, t_2 = \left\lfloor \frac{\lfloor log_2 t_1 \rfloor + 1 + w}{w} \right\rfloor \text{ e } t = t_1 + t_2.$$

As chaves privada e pública são, respectivamente,

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_k &= (x_{t-1}, \ldots, x_0) \xleftarrow{\$} \{0,1\}^n \text{ e} \\ \mathcal{P}_k &= (f^{2^w-1}(x_{t-1}), \ldots, f^{2^w-1}(x_0)) \\ &= (y_{t-1}, \ldots, y_0). \end{aligned}$$

Esquema de assinatura única Winternitz

Etapa de geração da assinatura

Os valores $\epsilon_i \in \{0,1\}^w$ são obtidos como a seguir:

$$\mathcal{H}(M) = \epsilon_{t-1} \,||\, \ldots \,||\, \epsilon_{t-t_1}, \qquad c = \sum_{i=t-t_1}^{t-1} 2^w - 1 - \epsilon_i,$$
$$\mathcal{B}_1 = (\epsilon_{t-1}, \ldots, \epsilon_{t-t_1}), \qquad \mathcal{B}_2 = (\epsilon_{t_2-1}, \ldots, \epsilon_0).$$

Finalmente, a assinatura de uso único é construída:

$$\sigma = (f^{\epsilon_{t-1}}(x_{t-1}), \ldots, f^{\epsilon_0}(x_0)).$$

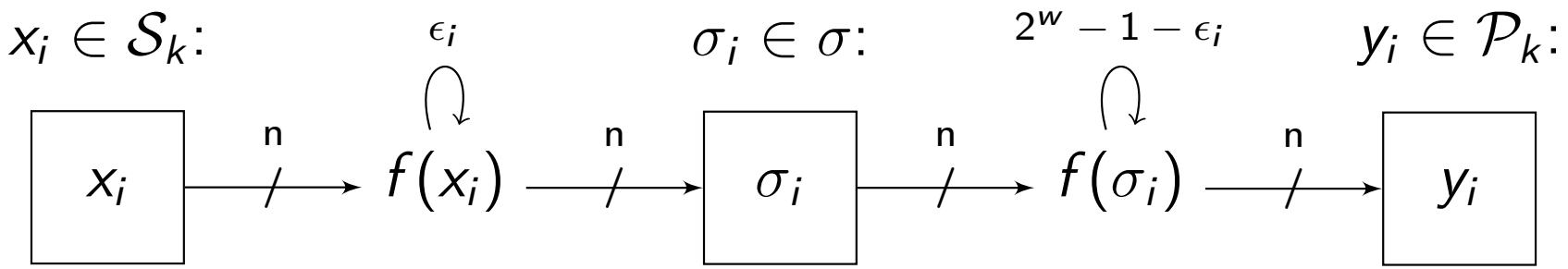
Esquema de assinatura única Winternitz

Etapa de verificação da assinatura

Os elementos ϵ_i são também utilizados na verificação de σ:

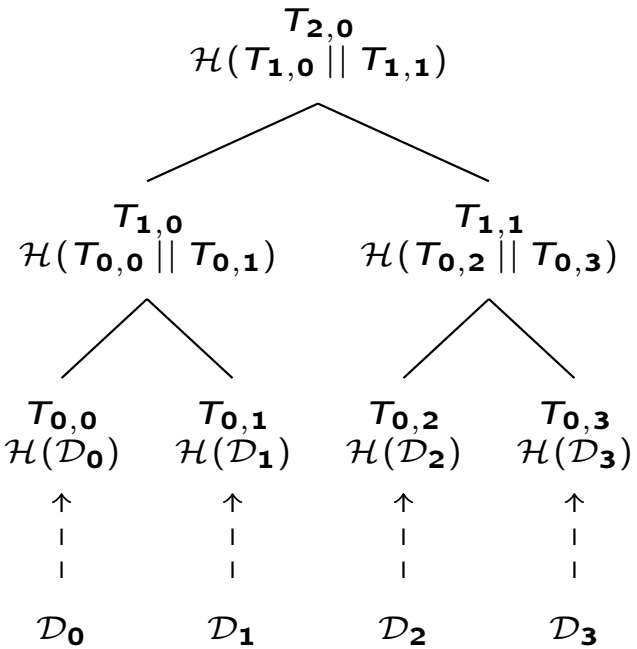
$$\forall \sigma_i \in \sigma, f^{2^w-1-\epsilon_i}(\sigma_i) = y_i.$$

Resumidamente,



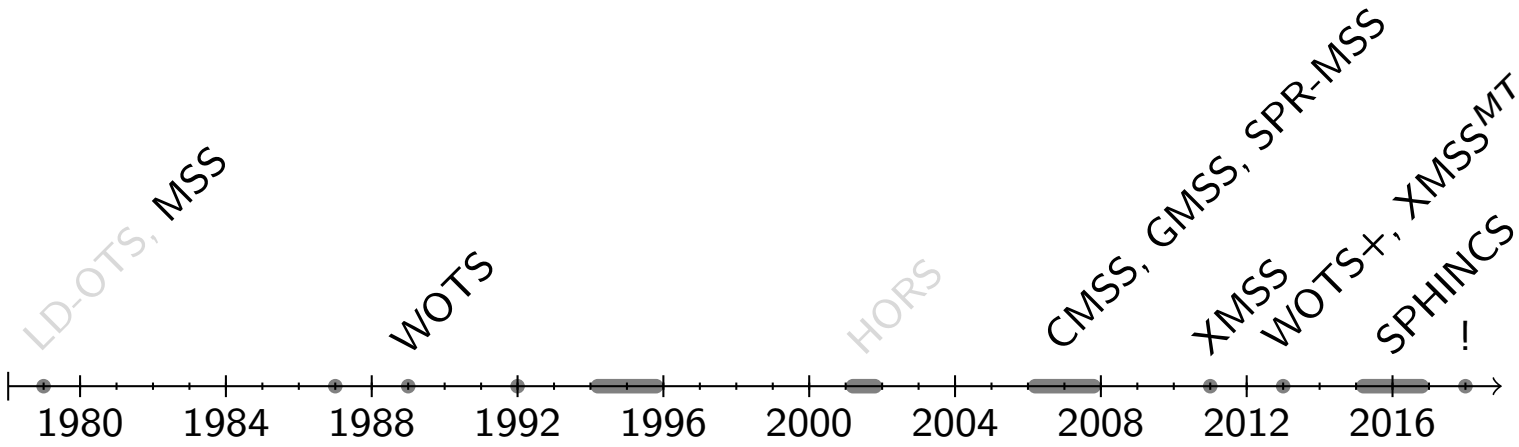
Esquemas baseados em árvores de Merkle

- Nó construído a partir da concatenação dos resumos de seus filhos
- Instância de esquema de assinatura única em cada folha da árvore
- Chaves públicas iniciarão a construção da árvore
- Winternitz e suas variantes disseminados em esquemas desta família



Nossas contribuições

Panorama de esquemas baseados em funções de resumo criptográfico



- Introdução de um parâmetro de compensação no Winternitz
  - Pode ser aplicada em qualquer variante deste esquema
  - Afeta todo esquema baseado em árvores de Merkle

Nossas contribuições

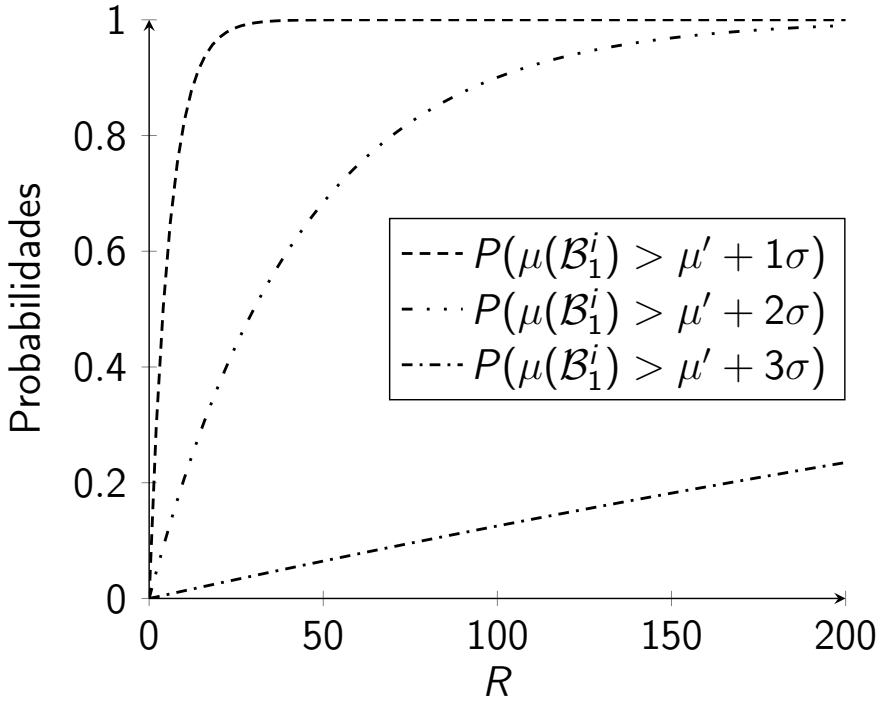
Melhora do desempenho da geração ou verificação de σ

- Busca de resumos cujo processamento é mais eficiente para um dos passos
- Escolher a mensagem $M' \leftarrow \lambda_i$ cuja $\mu(\mathcal{B}_1^i)$ é afastada da média
  - Limite de buscas codificado em $1 \leq i \leq R$
  - Amplitude de valores para $\mu(\mathcal{B}_1^i)$ cresce com R
- Minimização de $\mu(\mathcal{B}_1^i)$ traduz-se na otimização da geração de σ
- Maximização de $\mu(\mathcal{B}_1^i)$ permite a verificação eficiente de σ
  - Modificação de $\mathcal{B}_2$ para atingir ainda melhores resultados

Nossas contribuições

Critérios para escolha de R

- Definição de limites para amplitude de $\mu(\mathcal{B}_1^i)$
  - Assegurar que R buscas criarão um valor bem-posicionado
  - Utilização da distribuição binomial
- $R \in \{25, 200, 3500\}$



Nossas contribuições

Resultados

Parâmetros		Winternitz ($\#f$)		XMSS (ms)	
w	R	argmax	argmin	argmax	argmin
4	25	16.71%	16.03%	13.22%	9.48%
	200	22.05%	21.41%	16.08%	-3.60%
	3500	27.64%	27.12%	21.94%	-249.4%
8	25	23.76%	19.32%	22.22%	14.67%
	200	30.96%	26.83%	28.62%	17.23%
	3500	38.45%	34.83%	35.45%	-8.55%
16	25	34.35%	26.53%	—	
	200	43.41%	36.48%		
	3500	52.23%	46.56%		

Aumento de eficiência do esquema com modificações em $\mu(\mathcal{B}_1^i)$.

Referências bibliográficas

Oded Goldreich.
Foundations of Cryptography: Volume 2, Basic Applications.
1st edition, 2004.

J. Rompel.
One-way functions are necessary and sufficient for secure signatures.
In Harriet Ortiz, editor, *Proceedings of the Twenty-second Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, pages 387–394, May 1990.