

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA E ESTATÍSTICA**

Vinicius Macelai

VERIFICAÇÃO DE ELEIÇÃO UTILIZANDO BLOCKCHAIN

Florianópolis

2019

Vinicius Macelai

VERIFICAÇÃO DE ELEIÇÃO UTILIZANDO BLOCKCHAIN

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Programa de Graduação em Ciência da Computação para a obtenção do Grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Jean Everson Martins

Florianópolis

2019

Vinicius Macelai

VERIFICAÇÃO DE ELEIÇÃO UTILIZANDO BLOCKCHAIN

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado aprovado para a obtenção do Título de “Bacharel em Ciência da Computação”, e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Ciência da Computação.

Florianópolis, 01 de julho 2019.

Prof. EL FLETO, Dr.
Coordenador

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jean Everson Martina
Orientador

Fernando Pereira Me.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedicatoria top

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos

Citação topsa

RESUMO

As abordagens utilizadas nos sistemas de eleição da maioria dos países continuam a ser realizadas de forma manual, com cédulas na forma de papel. Tal modelo traz problemas enormes de logística e um alto custo para funcionamento devido aos requisitos de uma eleição segura, que deve fornecer privacidade, transparência, verificabilidade e confiabilidade. Já as abordagens eletrônicas via internet, ainda carregam desconfiança sobre manter estas propriedades. Uma possível solução para melhorar uma abordagem eletrônica seria utilizar uma blockchain para melhorar sua auditabilidade, que é o ponto mais questionado nesse esquema. A blockchain possui propriedades intrínsecas, como a imutabilidade dos dados, e com esquemas utilizando contratos inteligentes na blockchain é possível realizar a verificação dos votos de forma descentralizada e aberta ao público. Assim, cria-se um sistema que mantém as propriedades citadas anteriormente, com um baixo custo e menor necessidade de confiar em uma entidade central.

Palavras-chave: criptografia, eleições, democracia, blockchain, contratos inteligentes

ABSTRACT

As approaches used in the selection systems of most remaining countries an executed service manual with paper banknotes. Such a model brings huge logistical problems and a high cost of operation due to requirements of a safe selection, which should provide privacy, transparency, verifiability and requirements. Already the electronic approaches via internet, still carry distrust about maintaining these properties. A possible solution to improve an electronic approach would be to use a blockchain to improve your auditability, which is the most questioned point in this scheme. A blockchain has intrinsic properties such as data immutability and schemas smart contracts on blockchain it is possible to check votes decentralized and open to the public. Thus, a system is created that maintains as properties mentioned above, with a low cost and the least need to rely on a central entity.

Keywords: crypto, elections, democracy, blockchain, smart contracts

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|----------|--|----|
| Figura 1 | Imagem tirada do paper ACAR et al., 2018. | 32 |
| Figura 2 | Imagem tirada do whitepaper do Bitcoin..... | 34 |
| Figura 3 | Imagem tirada do whitepaper Ethereum..... | 35 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|------------------------------------|----|
| Tabela 1 | Custos do contrato resultado | 42 |
| Tabela 2 | Custos do contrato votos | 42 |
| Tabela 3 | Custos do contrato votantes | 42 |
| Tabela 4 | Custos do contrato eleição | 42 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EVM *Ethereum Virtual Machine*..... 34

LISTA DE SÍMBOLOS

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 25 |
| 1.1 | MOTIVAÇÃO | 26 |
| 1.2 | JUSTIFICATIVA | 26 |
| 1.3 | PERGUNTA DE PESQUISA | 26 |
| 1.4 | HIPÓTESES | 26 |
| 1.5 | OBJETIVO GERAL | 27 |
| 1.6 | OBJETIVO ESPECÍFICO | 27 |
| 1.7 | METODOLOGIA | 27 |
| 1.8 | RESULTADOS ESPERADOS | 27 |
| 2 | REVISÃO SISTEMÁTICA | 29 |
| 2.1 | DESCRIÇÃO | 29 |
| 2.2 | DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE BUSCA | 29 |
| 2.3 | RESULTADOS | 29 |
| 3 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 31 |
| 3.1 | SEGURANÇA EM COMPUTAÇÃO | 31 |
| 3.2 | ELEIÇÕES DIGITAIS | 31 |
| 3.3 | HASH | 31 |
| 3.4 | CRIOPTOGRAFIA HOMOMÓRFICA | 31 |
| 3.5 | BLOCKCHAIN | 32 |
| 3.5.1 | Cadeia de blocos | 32 |
| 3.6 | CONTRATOS INTELIGENTES | 33 |
| 4 | HELIOS | 37 |
| 5 | DESENVOLVIMENTO | 39 |
| 5.1 | MODIFICAÇÃO DO SOFTWARE HELIOS | 39 |
| 5.2 | CONTRATOS INTELIGENTES | 39 |
| 5.2.1 | Descrição do contrato | 39 |
| 5.3 | CUSTO FINANCEIRO | 41 |
| | REFERÊNCIAS | 43 |

1 INTRODUÇÃO

Ainda que vivamos no momento onde tudo é digital e façamos as mais diversas tarefas de maneira eletrônica e online, quando o assunto é votação no meio eletrônico, existem as mais diversas e controversas opiniões a respeito.

No Brasil, eleições eletrônicas têm sido utilizadas por mais de 20 anos e testes recentes mostram que, mesmo com o desenvolvimento durante todo esse período, o atual sistema não consegue se mostrar realmente seguro(ARANHA, 2018). O maior problema com a solução proposta pelo Governo Brasileiro é a falta de auditabilidade, em que só é possível se voluntariar para testar o sistema em um ambiente controlado. Ainda durante o processo eleitoral, é necessário confiar cegamente no sistema, não há instrumento nenhum que permita verificar se o voto foi realmente computado.

Os sistemas de votação eletrônicos atuais se baseiam em esquemas que utilizam de criptografia homomórfica, que permite que dados cifrados possam ser processados sem serem decifrados, assim garantindo propriedades importantes para o sistema.(SMART; VERCAUTEREN, 2010). Entretanto, esses esquemas são utilizados de forma centralizada, rodando apenas em um servidor central, sem a possibilidade de tais informações serem acessadas pelo o público em geral de maneira transparente.

Para realizar a auditoria das votações, é possível utilizar da tecnologia blockchain, que são bases de registro de dados distribuídos e compartilhados, desta forma criando um consenso e confiança sobre o estado atual do sistema.(NAKAMOTO, 2009). Garantir essas propriedades intrínsecas, como a imutabilidade dos dados, é um bom sistema para manter o registro dos votos, além da possibilidade de rodar contratos inteligentes que podem processar os votos de maneira descentralizadas junto com a criptografia homomórfica para garantir o anonimato.

Neste trabalho, optou-se por enfatizar o estudo e a utilização da blockchain e protocolo Ethereum, a qual fornece contratos inteligentes de alto nível(BUTERIN, 2014). Apresenta-se um esquema que utiliza esses contratos para garantir as propriedades já citadas, além do estudo de seu impacto financeiro.

Ainda, visa implementar uma solução que integre todas estas partes, um sistema de eleição eletrônico que permite ter informações sobre o votante de forma confiável. Além disso, almeja possibilitar a realização da verificação da eleição em uma blockchain de forma descentralizada e pública.

1.1 MOTIVAÇÃO

Os modelos de eleição utilizados nos dias de hoje são em sua maioria em cédulas de papel. Dependendo da dimensão da votação, isso externaliza grandes problemas, no que concerne à logística, que tem como consequência um aumento de custos. Já as abordagens que utilizam do meio eletrônico e online, geram grande desconfiança para a maioria das partes interessadas, com receio que o resultado seja hackeado e alterado. Consequentemente há uma demanda por um modelo de votação que seja mais auditável e aberto para sanar esse problema de desconfiança.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este tema foi escolhido devido sua grande importância, uma vez impacta basicamente todos os setores da sociedade, pois existem votações nas mais diversas esferas, desde a governança de empresas, até consultas de opinião sobre assuntos delicados. Além dos pontos anteriores citados, a utilização da recente tecnologia blockchain para a solução destes problemas é uma grande inovação na área. Este trabalho visa contribuir com modelos mais eficientes e transparentes, que beneficiarão a sociedade como um todo.

1.3 PERGUNTA DE PESQUISA

Este trabalho visa responder se é possível construir um modelo de eleição eletrônica utilizando a blockchain para garantir uma maior auditabilidade do sistema. Além de responder até qual volume de dados seria possível processar em contratos inteligentes na blockchain, juntamente com o cálculo econômico.

1.4 HIPÓTESES

- É possível criar um modelo de eleição eletrônica utilizando blockchain para fornecer maior auditabilidade.
- É viável utilizar a blockchain Ethereum até qual volume dados.
- É economicamente viável esse modelo.

1.5 OBJETIVO GERAL

Estudar e criar a implementação de um sistema online de eleição, com foco principal na parte de realizar auditoria e verificação dos votos em blockchain com auxílio de contratos inteligentes, utilizando um sistema já desenvolvido. Além disso, analisar as implicações que esse sistema teria no funcionamento e custos de uma eleição.

1.6 OBJETIVO ESPECÍFICO

- i. Analisar o estado da arte: estudar as principais soluções já propostas na literatura com o objetivo de identificar problemas e oportunidades para melhorar o trabalho.
- ii. Implementar possibilidade de verificação na blockchain: Criação de um módulo para tornar o sistema mais auditável e verificável para o público em geral.
- iii. Comparar e analisar as consequências do esquema.

1.7 METODOLOGIA

O trabalho será desenvolvido utilizando a infraestrutura e recursos do Laboratório de Segurança em Computação (LabSEC/UFSC), em que será estudada a bibliografia referente aos assuntos abordados nesta pesquisa, visando encontrar uma abordagem para um sistema de eleição eletrônica com blockchain e contratos inteligentes. Frisando suas vantagens e desvantagens e seus custos.

1.8 RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se contribuir para o estado da arte em eleição eletrônica utilizando blockchain de forma que aumente a transparência e a auditabilidade do processo. É esperado também que tal abordagem tenha um gargalo no volume de dados processados, visto que a tecnologia blockchain por ser descentralizada, não conseguirá processar diversas transações por segundo. Além de que, como há muito processamento de dados, devido a criptografia homomórfica, tende a ser inviável economicamente para casos onde não há necessidade

de tanta segurança.

2 REVISÃO SISTEMÁTICA

2.1 DESCRIÇÃO

Este capítulo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática do estado da arte sobre a tecnologia *blockchain* com sua utilização em eleições eletrônicas, irá ser verificado se já há algum trabalho que tenha o mesmo objetivo deste, garantir um processo melhor de auditoria utilizando de prova de existência com a *blockchain*. Foi decidido realizar uma revisão sistemática para garantir que não haja vieses na revisão do estado da arte. A revisão sistemática segue um método de seleção e análise de dados e trabalhos definidos anteriormente da revisão em si, em um processo rígido e bem definido, evitando vieses.

2.2 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE BUSCA

A busca foi realizada nos maiores banco de dados de trabalhos científicos disponíveis, Google Scholar e Scopus. As palavras chaves utilizadas são *Smart contracts* e *Elections*, dando exclusividade a trabalhos em inglês. A busca foi reduzida para trabalhos publicados apenas nos anos de 2018 e 2019, para se obter resultados apenas do estado atual. Desta busca, foram revisados os 10 primeiros trabalhos de cada banco de buscas, da forma que cada banco de pesquisas tem seu modelo de relevância para determinar as primeiras colocações, como número de citações e melhor encaixe com as palavras chaves pesquisadas.

2.3 RESULTADOS

De acordo com a pesquisa e revisão sistemática realizada, foi constatado que o tema geral de se utilizar *smart contracts* em processos de eleições digitais é bastante pesquisado. Entretanto foi verificado que esses trabalhos têm um objetivo diferente deste, onde eles utilizam da *blockchain* e *smart contracts* para realizar todo o processo da eleição, desde a criação de uma eleição, cadastro de pessoas autorizadas a votar e resultado final da eleição. Os trabalhos focam em realizar o processo inteiro em *smart contracts*.

Como no trabalho realizado com o objetivo de se ter eleições de larga escala com *blockchain* é proposto um esquema de votos utilizando de cripto-

grafia homomórfica de ElGamal juntamente com assinaturas em anel. (WANG et al., 2018) Este esquema é amplamente conhecido e utilizados em outras implementações de eleições digitais, como por exemplo, no software Helios, que é um software de código aberto feito para eleições digitais verificáveis.

Já outros trabalhos não utilizam esquema nenhuma de criptografia para esconder o voto ou quem votava, apenas se baseava na hipótese de um endereço da *blockchain* fosse seu pseudônimo. (Yavuz et al., 2018) Essa abordagem é muito simples para a maioria dos casos e não garante propriedades como anonimidade do voto, visto que é possível rastrear as carteiras de uma *blockchain* com análises estatísticas. (KOSHY; KOSHY; MCDANIEL, 2014)

Entretanto a abordagem deste trabalho consiste em realizar essas operações em um software padrão centralizado, como o Helios, e apenas utilizar da *blockchain* para publicar o resultado destas operações, visto que a complexidade computacional de tais operações é elevada.

Conclui-se então que os trabalhos já publicados com esse tema de pesquisa têm um objetivo diferente deste trabalho proposto.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 SEGURANÇA EM COMPUTAÇÃO

3.2 ELEIÇÕES DIGITAIS

3.3 HASH

3.4 CRIPTOGRAFIA HOMOMÓRFICA

A ideia de usar homomorfismo na criptografia surgiu em um trabalho científico publicado com o objetivo de propor um criptossistema em um cenário de aumento da utilização de terminais remotos. Neste caso, não seria ideal ter acesso a todo o banco de dados cifrados e então decifrá-los para trabalhar os dados. Neste contexto, surge o conceito de se operar com dados cifrados e obter-se o mesmo resultado caso se estivesse operando em texto plano.(RIVEST; ADLEMAN; DERTOUZOS, 1978)

Criptografia homomórfica inclui diversos tipos de esquemas de criptografia que podem ser executados em diferentes classes de dados cifrados. Os tipos mais comuns de homomorfismo em criptografia são parcialmente homomórfico, relativamente homomórfico e completamente homomórfico.(ACAR et al., 2018)

O nome criptografia homomórfica é derivado do conceito de homomorfismo em álgebra abstrata. Um homomorfismo é uma aplicação que preserva a estrutura entre duas estruturas algébricas X e Y .

$$f : X \longrightarrow Y \quad (3.1)$$

Seja α uma função de ciframento e β uma função de descriptação correspondente. Sejam x_1, x_2 dados em texto plano. A tupla (α, β) é uma cifra homomórfica com o operador \star se a propriedade for satisfeita:

$$\beta(\alpha(x_1)) \star (\alpha(x_2)) = x_1 \star x_2 \quad (3.2)$$

As operações principais de um esquema homomórfico de criptografia são: *KeyGen*, *Encryption*, *Decryption*, *Eval*. *KeyGen* é a operação para criar uma chave pública e outra privada em uma versão de criptografia assimétrica e a criação de uma chave única em modelo simétrico. *KeyGen*, *Encryption*, *Decryption* não são diferentes de suas funções em seus modelos tradicionais.

Entretanto, *Eval* é uma operação específica de sistemas homomórficos, que tem como entrada e saída textos cifrados, adicionalmente, o dado cifrado resultante não deve aumentar de tamanho, caso contrário, haveria um limite de operações possíveis.(ACAR et al., 2018)

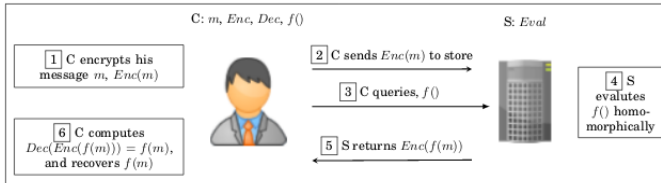


Figura 1 – Imagem tirada do paper ACAR et al., 2018.

3.5 BLOCKCHAIN

Da sua tradução literal, blockchain significa cadeia de blocos. De maneira simplista, pode ser definido como um bloco ligado com o anterior, gerando assim uma cadeia. Estes blocos carregam as informações que são importantes para a rede. No caso de uma criptomoeda como *Bitcoin*, cada bloco teria dados sobre as transações realizadas naquele dado instante, ou seja, uma definição do estado atual do sistema.

A concepção da blockchain foi feita para ser um encadeamento de registros imutáveis, distribuídos e públicos. Os registros são imutáveis devido ao tipo de encadeamento que é feito com os blocos, em que o ponteiro para o bloco anterior é projetado para garantir a imutabilidade dos dados. Como é um protocolo distribuído, todas as informações não estão armazenadas em um servidor central e não há um nodo mestre que coordene a rede. Justamente o oposto disso, a blockchain está replicada em todos os nodos participantes da rede, que podem estar espalhados pelo mundo inteiro. Além de ser um esquema distribuído, o referido também é público, pois não há como censurar uma parte de participar da rede, basta o interessado ter acesso a internet que ele poderá realizar a sua cópia da base de dados.(UNDERWOOD, 2016)

3.5.1 Cadeia de blocos

A estrutura de um bloco é basicamente a seguinte:

- Constante de valor 0xD9B4BEF9.

- Tamanho do bloco em *bytes*.
- Cabeçalho do bloco, que consiste em 6 itens.
- Quantidade de transações no bloco.
- Transações em si.

Vale notar que as transações detêm uma estrutura de dados que permite a criação de *scripts*, além de permitir a inserção de dados arbitrários.

Já a estrutura do cabeçalho do bloco é composta por:

- Versão do bloco.
- *Hash* do bloco anterior.
- *Hash* do bloco atual, baseado em todas as transações do bloco.
- *Timestamp* em que o bloco foi criado.
- *Nonce*, número aleatório que é utilizado na mineração dos blocos.
- *Bits*, objetivo atual da mineração em formato compactado.

Esta estrutura de dados permite que qualquer participante da rede possa validar o bloco de maneira rápida. Existe o desafio matemático para a criação de blocos, isto é, para criar um novo bloco, ele deve calcular um *Hash* com uma pseudo colisão de acordo com a variável *Bits* do cabeçalho. Resolver esse desafio matemático é chamado de mineração, e a cada bloco que passa se torna mais difícil, entretanto, uma vez que sua solução é conhecida, é extremamente fácil de validar sua correitude. Há diversas soluções possíveis para determinado bloco, porém é necessário que apenas uma seja encontrada.(ANTONPOULOS, 2014)

Como a mineração de blocos se torna cada vez mais difícil, a probabilidade de algum atacante conseguir reescrever um bloco anterior é mínima, visto que ele teria que concluir o desafio matemático para o bloco que deseja modificar e ainda todos os sucessores dele.

3.6 CONTRATOS INTELIGENTES

A ideia de contrato sempre esteve presente durante todo o curso da humanidade, com a evolução da sociedade foi se criando novos conceitos para se formalizar uma relação. O contrato é o pilar das relações econômicas modernas. Entretanto esse mecanismo tem um custo elevado, durante o processo

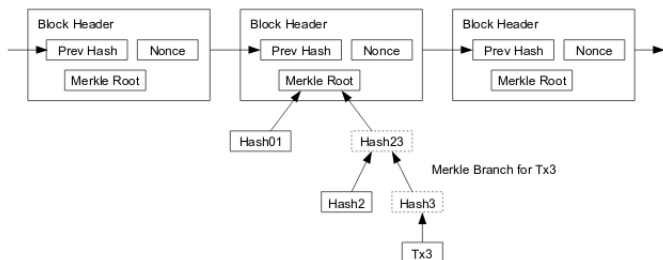


Figura 2 – Imagem tirada do whitepaper do Bitcoin.

de criação e utilização de contratos, normalmente baseados em lei comum, que muitas vezes torna-se inviável para determinados casos.

Idealizado no ano de 1997 por Nick Szabo, os contratos inteligentes foram pensados como uma substituição natural dos contratos realizados no cotidiano. Em analogia, a ideia é utilizar de software e hardware para a tomada de decisões, como em uma máquina automática de vendas de refrigerante. Os contratos inteligentes vão além da máquina de vendas, uma proposta de utilização de contratos em todos os tipos de propriedade e controlado do meio digital. Eles possibilitam a verificação desse contrato de maneira dinâmica e proativa.(SZABO, 1997)

Já no surgimento da blockchain descrito no protocolo do Bitcoin, havia espaço para criação de *scripts* nas transações. Entretanto, estes *scripts* foram concebidos para serem simples, com a ideia de não sobrecarregar a rede com a execução de códigos complexos. Um exemplo de *script* trivial seria o congelamento de fundos até certa data futura. Como não são permitido *loops* em sua estrutura, isto impacta na não Turing completude da linguagem de *script*.(NAKAMOTO, 2009)

Almejando-se ter *scripts* mais potentes, foi criado o conceito de contratos inteligentes, que são Turing-completos e ainda podem guardar o estado atual do sistema. Assim, possibilita a criação de aplicações extremamente mais complexas.(BUTERIN, 2014)

A *blockchain Ethereum* foi criada juntamente com sua *Virtual Machine*, a EVM como é chamada, que utiliza de um vasto conjunto de instruções para executar tanto tarefas específicas quanto gerais. Para armazenar os conjuntos de instruções de forma eficiente, a EVM os codifica em *bytecodes*.(WOOD, 2014)

Consequentemente com a criação do conjunto de instruções, houve a criação de uma linguagem de programação de alto nível que é compilada para esses *bytecodes* específicos. *Solidity* foi criada para ser uma linguagem

simples de ser entendida e reproduzida para quem já têm os conhecimentos de programação de outras linguagens padrões de alto nível. (ZAKRZEWSKI, 2018)

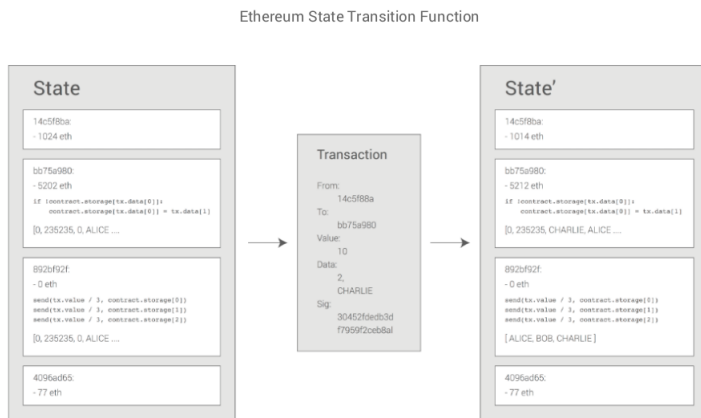


Figura 3 – Imagem tirada do whitepaper Ethereum

Desta forma, é possível criar aplicações que rodam de forma descentralizada e que podem ter seu estado atual verificado por qualquer participante do sistema em qualquer momento além de garantir as propriedades da blockchain.

4 HELIOS

Neste capítulo será apresentado o software Helios, em que este trabalho se baseia para criar um módulo *blockchain* para realizar a prova de existência das informações importantes dessa uma eleição no Helios.

5 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo será abordado a criação do esquema e desenvolvimento do projeto proposto.

5.1 MODIFICAÇÃO DO SOFTWARE HELIOS

Para ter acesso as informações relevantes para o esquema foram criados alguns *endpoints* que disponibilizam essas informações, sendo essas:

- GET ‘elections/<election_uuid>/’ retorna todas as informações públicas da eleição
- GET ‘elections/<election_uuid>/voters’ retorna todas as informações públicas dos eleitores
- GET ‘elections/<election_uuid>/result’ retorna todas as informações sobre o resultado

5.2 CONTRATOS INTELIGENTES

5.2.1 Descrição do contrato

```

1
2 pragma solidity ^0.5.11;
3 pragma experimental ABIEncoderV2;
4
5 contract Result {
6
7     struct Question {
8         string question;
9         int result;
10    }
11
12    Question[] public questions;
13    string public voters_hash;
14    uint256 public released_at;
15
16    function addQuestion(string memory _question, int
        _result) public {
17        questions.push(Question(_question, _result));
18    }

```

```

19
20     function setVotersHash(string memory _voters_hash)
21         public {
22             voters_hash = _voters_hash;
23         }
24
25     function setReleaseAt(uint256 _relesed_at) public {
26         relesed_at = _relesed_at;
27     }
28 }
29
30 contract Votes {
31     struct Vote {
32         string vote_hash;
33         uint256 cast_at;
34     }
35
36     Vote[] public votes;
37
38     function addVote(string memory _vote_hash, uint256 _cast
39         ) public {
40         votes.push(Vote(_vote_hash, _cast));
41     }
42 }
43
44
45 contract Voters{
46
47     struct Voter {
48         string uuid;
49         string name;
50         string email;
51     }
52
53     Voter[] public voters;
54
55     function addVoter(string memory _uuid, string memory
56         _name, string memory _email) public {
57         voters.push(Voter(_uuid, _name, _email));
58     }
59 }
60
61 contract Election {
62     string public uuid;
63     string public name;
64     string public cast_url;
65     uint256 public created_at;
66     uint256 public voting_starts;
67     uint256 public voting_ends;

```

```

68
69     struct Public_Key {
70         string p;
71         string q;
72         string g;
73         string y;
74     }
75
76     Public_Key public public_key;
77
78     struct Question {
79         string question;
80         string[] answers;
81     }
82
83     Question[] public questions;
84
85     Voters public voters_contract;
86     Votes public votes_contract;
87     Result public result_contract;
88
89     constructor(string memory _uuid, string memory _name,
90                 string memory _cast_url, uint256 _created_at,
91                 uint256 _voting_starts, uint256 _voting_ends,
92                 string memory _p, string memory _q, string
93                 memory _g, string memory _y) public {
94         uuid = _uuid;
95         name = _name;
96         cast_url = _cast_url;
97         created_at = _created_at;
98         voting_starts = _voting_starts;
99         voting_ends = _voting_ends;
100        public_key = Public_Key(_p, _q, _g, _y);
101        voters_contract = new Voters();
102        votes_contract = new Votes();
103        result_contract = new Result();
104    }
105
106    function addQuestion(string memory _question, string[]
107        memory _answers) public {
108        questions.push(Question(_question, _answers));
109    }
110 }

```

5.3 CUSTO FINANCEIRO

Considerando Gas Price de 25 gwei, visto em 25/09/2019

| Método | Gas | Dólar |
|---------------|--------|--------|
| constructor | 571316 | \$2.41 |
| addQuestion | 84624 | \$0.35 |
| setVotersHash | 87482 | \$0.36 |
| setReleasedAt | 42164 | \$0.17 |

Tabela 1 – Custos do contrato resultado

| Método | Gas | Dólar |
|-------------|--------|--------|
| constructor | 389806 | \$1.64 |
| addVote | 128449 | \$0.54 |

Tabela 2 – Custos do contrato votos

| Método | Gas | Dólar |
|-------------|--------|--------|
| constructor | 508588 | \$2.14 |
| addVoter | 151882 | \$0.64 |

Tabela 3 – Custos do contrato votantes

| Método | Gas | Dólar |
|-------------|---------|---------|
| constructor | 2684091 | \$11.34 |
| addQuestion | 129270 | \$0.54 |

Tabela 4 – Custos do contrato eleição

REFERÊNCIAS

ACAR, A. et al. A survey on homomorphic encryption schemes: Theory and implementation. **ACM Comput. Surv.**, ACM, New York, NY, USA, v. 51, n. 4, p. 79:1–79:35, jul. 2018. ISSN 0360-0300. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/3214303>>.

ANTONOPOULOS, A. M. **Mastering Bitcoin: Unlocking Digital Crypto-Currencies**. 1st. ed. [S.l.]: O'Reilly Media, Inc., 2014. ISBN 1449374042, 9781449374044.

ARANHA, Y. **Execução de código arbitrário na urna eletrônica brasileira**. 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication-326261911_Execucao_de_codigo_arbitrario_na_urna_eletronica_brasileira>.

BUTERIN, V. **Ethereum: A next-generation smart contract and decentralized application platform**. 2014. Accessed: 2016-08-22. Disponível em: <<https://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper>>.

KOSHY, P.; KOSHY, D.; MCDANIEL, P. An analysis of anonymity in bitcoin using p2p network traffic. In: CHRISTIN, N.; SAFAVI-NAINI, R. (Ed.). **Financial Cryptography and Data Security**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. p. 469–485. ISBN 978-3-662-45472-5.

NAKAMOTO, S. **Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system**. 2009. Disponível em: <<http://www.bitcoin.org/bitcoin.pdf>>.

RIVEST, R. L.; ADLEMAN, L.; DERTOUZOS, M. L. On data banks and privacy homomorphisms. **Foundations of Secure Computation, Academia Press**, p. 169–179, 1978.

SMART, N. P.; VERCAUTEREN, F. Fully homomorphic encryption with relatively small key and ciphertext sizes. In: NGUYEN, P. Q.; POINTCHEVAL, D. (Ed.). **Public Key Cryptography – PKC 2010**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 420–443. ISBN 978-3-642-13013-7.

SZABO, N. Formalizing and securing relationships on public networks. **First Monday**, v. 2, n. 9, 1997.

UNDERWOOD, S. Blockchain beyond bitcoin. **Communications of the ACM**, v. 59, p. 15–17, 10 2016.

WANG, B. et al. Large-scale election based on blockchain. **Procedia Computer Science**, v. 129, p. 234 – 237, 2018. ISSN 1877-0509. 2017 INTERNATIONAL CONFERENCE ON IDENTIFICATION, INFORMATION AND KNOWLEDGE IN THE INTERNET OF THINGS. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050918302874>>.

WOOD, G. **Ethereum: a secure decentralised generalised transaction ledger**. 2014. <http://gavwood.com/paper.pdf>.

Yavuz, E. et al. Towards secure e-voting using ethereum blockchain. In: **2018 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–7.

ZAKRZEWSKI, J. Towards verification of ethereum smart contracts: A formalization of core of solidity: 10th international conference, vstte 2018, oxford, uk, july 18–19, 2018, revised selected papers. In: _____. [S.l.: s.n.], 2018. p. 229–247. ISBN 978-3-030-03591-4.