

**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 novembro 2019.

Prof. Me. José Francisco Danilo de Guadalupe Correa Fletes
Coordenador

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jean Everson Martina
Orientador

Me. Fernando Pereira
Universidade Federal de Santa Catarina

Gustavo Zambonim
Universidade Federal de Santa Catarina

A todas as pessoas que eu amo

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que desde sempre me incentivou e me deu todo o suporte necessário nessa longa caminhada de estudos. Sem esse apoio, nada disso seria possível. Em especial a Bruna Luiza, que sempre tentou me manter motivado e dando apoio em todas formas possíveis.

Agradeço ao meu orientador Jean Martina, por todo o conhecimento compartilhado e incentivar a busca por aprimoramento pessoal.

Ao LabSEC por ter me acolhido e contribuir para a minha formação acadêmica e profissional, além de, toda a amizade que construí com os colegas em as diversas idas ao Restaurante Universitário.

Aos amigos que fiz durante a graduação, que fizeram parte dessa jornada, passando muito tempo jogando no Centro Acadêmico, ao companheirismo durante as matérias e tantas outras coisas que se passa durante uma graduação.

E não menos importante aos amigos do futebol de quinta, que forneceram uma válvula de escape para momentos cômicos e de vital importância a toda essa caminhada.

“We shall meet in the place where there is no darkness.”

- George Orwell, 1984

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	TODO citar wiki	33
Figura 2	Imagem tirada do paper ACAR et al., 2018.	34
Figura 3	Imagem tirada do whitepaper do Bitcoin.....	36
Figura 4	Imagem tirada do whitepaper Ethereum.....	37
Figura 5	Painel administrativo de uma eleição	45
Figura 6	Painel administrativo de resultado	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Custos do contrato resultado	49
Tabela 2	Custos do contrato votos	49
Tabela 3	Custos do contrato votantes	49
Tabela 4	Custos do contrato eleição	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EVM *Ethereum Virtual Machine*..... 37

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 DA INFORMAÇÃO.....	31
3.2	HASH	32
3.3	CRIPTOGRAFIA HOMOMÓRFICA	33
3.4	BLOCKCHAIN	34
3.4.1	Cadeia de blocos	35
3.5	CONTRATOS INTELIGENTES	36
4	HELIOS	39
4.1	INTRODUÇÃO	39
4.2	SOBRE	39
4.3	PROCESSO DE VOTO	40
4.4	INFORMAÇÕES RELEVANTES PARA AUDITORIA	41
5	DESENVOLVIMENTO	45
5.1	MODIFICAÇÃO DO SOFTWARE HELIOS	45
5.2	CONTRATOS INTELIGENTES	46
5.2.1	Descrição do contrato	46
5.3	CUSTO FINANCEIRO	48
6	CONCLUSÃO	51
6.1	TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS	53

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 módulo para um sistema de eleição eletrônico que permite ter informações sobre o votante de forma confiável. Além disso, almeja possibilitar a realização da verificação de integridade da eleição, além de detectar alguma tentativa de mudança dos parâmetros da votação já pré-definidos em uma blockchain de forma descentralizada e pública.

Por fim, realizar um estudo do custo operacional para rodar tal es-

queima. De maneira a definir individualmente cada custo com o esquema proposto e realizar uma discussão para saber até que ponto seria economicamente viável tal modelo.

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 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

Neste capítulo estão descritos os conceitos básicos para o entendimento do trabalho, desde a parte básica de conceitos de segurança, bem como os algoritmos e ferramentas utilizadas ao longo do trabalho.

3.1 SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO

Os conceitos descritos pela segurança da informação não estão restritos apenas a sistemas computacionais. O conceito pode ser aplicado a todos os aspectos de proteção de informações e dados.

No momento atual, estes conceitos estão padronizados pela norma ISO/IEC 17799:2005, fortemente influenciada pelo padrão inglês BS 7799.

Segundo a ISO/IEC 17799, os atributos básicos sobre segurança de informação são:

- *Confidencialidade*: Visa limitar o acesso da informação para apenas os participantes que o remetente autorizou, e ninguém mais.
- *Integridade*: Garante que a informação enviada pelo remetente permaneça com suas características originais, de maneira que, caso alterada, seja possível ser detectado. Garantindo o ciclo de vida da informação.
- *Autenticidade*: Assegura que a informação enviada pelo remetente não foi manipulada por terceiros ao longo do processo.
- *Disponibilidade*: Atesta que a informação esteja sempre disponível para os participantes que detêm autorização de uso.
- *Não Repúdio*: Certifica que não há como negar a autoria de uma mensagem.
- *Conformidade*: Garante que o sistema segue as regras e regulamentos definidos a esse tipo de processo.
- *Tempestividade*: Possibilita a comprovação que um determinado episódio ocorreu em dado instante de tempo.

(ISO17799, 2005)

3.2 HASH

Funções Hash são conhecidas também como funções de sentido único, o objetivo dessa função é de relevar uma pequena porção de informação sobre uma mensagem ou entrada de tamanho arbitrário. Essa pequena quantidade de informação relevada deve ter um tamanho suficiente para identificar a entrada de maneira única e o tamanho dessa saída deve ser fixo. Um requisito para o uso dessas funções em criptografia é que ela deve ser computacionalmente difícil e intensiva para um atacante gerar duas entradas que geram o mesmo valor hash. (GATHEN, 2015)

Definição: Seja $\mathcal{H} : X \rightarrow Z$ um mapeamento entre dois conjuntos finitos X e Z . \mathcal{H} é uma função de Hash.

As propriedades da função \mathcal{H} devem ser:

- Eficiência: a verificação do resumo de $\mathcal{H}(x)$ precisa ser facilmente verificado.
- A saída de \mathcal{H} para um X fixo deve ser sempre a mesma.

Já na classe de funções hash que são para o uso criptográfico, há a necessidade de algumas características adicionais:

- Resistência a colisão: Deve ser computacionalmente difícil encontrar duas entradas distintas $m1$ e $m2$, tal que $\mathcal{H}(m1) = \mathcal{H}(m2)$. Essas duas entradas são chamadas de colisão hash.
- Resistência a pré-imagem: Dado uma saída r deve ser computacionalmente difícil encontrar alguma outra entrada m , tal que $\mathcal{H}(m) = r$. Esta propriedade esta relacionada a ser uma função de sentido único.
- Resistência a segunda pré-imagem: Dado uma entrada $m1$ deve ser computacionalmente difícil encontrar alguma outra entrada $m2$, tal que $\mathcal{H}(m1) = \mathcal{H}(m2)$
- Pseudo-aleatoriedade: A saída de \mathcal{H} deve ter a propriedade de ser pseudo-aleatoria.
- Efeito avalanche: Caso haja a mudança de apenas um bit em uma determinada entrada, a saída de \mathcal{H} deve ser significadamente diferente.

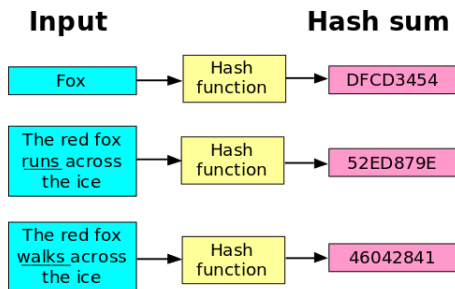


Figura 1 – TODO citar wiki

As funções de sentido único tem diversas utilidades na área de computação, desde na busca de dados em uma estrutura de dados chamado de tabela hash, que possibilita consultas de forma rápida, até na parte de banco de dados, que é possível a detecção de registros duplicados ou até mesmo a não integridade de determinado dado.

Na área de criptografia há ainda a utilização em assinaturas digitais, códigos de autenticação de mensagens, e ainda outras formas de autenticação. Além do mais é muito utilizada em *blockchains*, com sua finalidade em fornecer prova de trabalho e outras propriedades como utilizar um endereço sem revelar sua chave pública e consequentemente sua privacidade.(Halpin; Piekarska, 2017)

3.3 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 homo-

morfismo em álgebra abstrata. Um homomorfismo é uma aplicação que preserva a estrutura entre duas estruturas algébricas X e Z .

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

Seja α uma função de ciframento e β uma função de descifração 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)

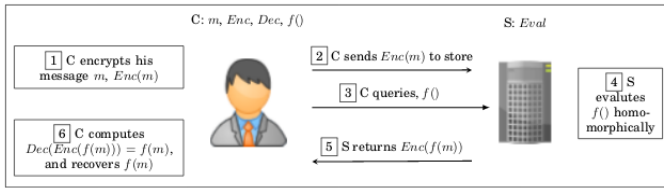


Figura 2 – Imagem tirada do paper ACAR et al., 2018.

3.4 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)

3.4.1 Cadeia de blocos

A estrutura de um bloco pode variar de acordo com a necessidade e propósitos da cadeia de blocos, vamos tomar como exemplo a cadeia do *Bitcoin*, visto que foi a primeira a ser criada e até hoje é mais importante e mais utilizada. 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 correteude. Há diversas soluções possíveis para determinado bloco, porém é necessário que apenas uma seja encontrada.(ANTONOPOULOS, 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.

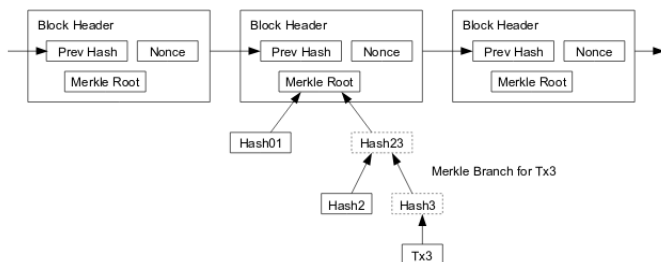


Figura 3 – Imagem tirada do whitepaper do Bitcoin.

3.5 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 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 con-

trolado 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 da 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)

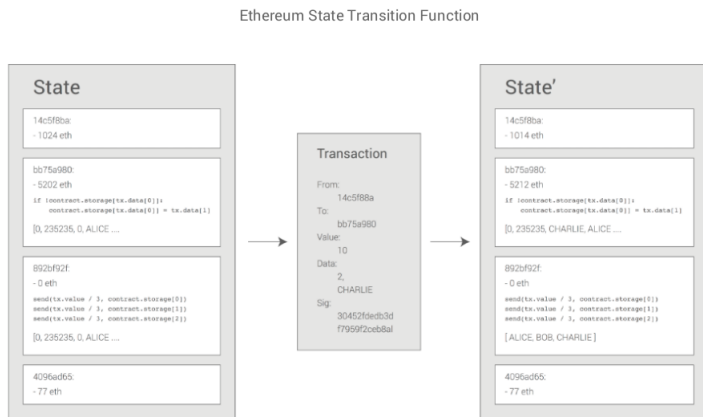


Figura 4 – Imagem tirada do whitepaper Ethereum

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

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado o software Helios voting, em que este trabalho se baseia para criar um módulo *blockchain* para realizar a prova de existência das informações importantes para a verificação e auditoria de uma eleição neste software.

4.2 SOBRE

Helios voting é um software de código aberto desenvolvido por Ben Adida. Foi desenvolvido com o intuito de ser o primeiro aplicativo baseado na *Web*, de auditoria aberta ao público. De maneira que qualquer um poderia rodar sua própria eleição, e quem estiver disposto a observar o processo e auditar o processo inteiro conseguiria também. É concebido para ser usado em clubes locais, eleições para reitor de universidade e comunidades online. De maneira votos secretos são necessários e a coerção não é um grande problema.(ADIDA, 2008)

O código do front-end foi escrito em *JavaScript* e *HTML*, e a parte do servidor foi desenvolvida em *Python* com o framework para aplicações web *Django*.

Algumas características do esquema proposto:

- Eleições com baixa coerção: Votações online e por carta sempre tiveram um problema de coerção, visto que, nessa abordagem é possível que na hora do voto, há outra pessoa forçando por meio de ameaças ou força física a maneira que a pessoa vote. Alguns sistemas possibilitem que o voto seja feito mais de uma vez para mitigar esse problema, assim, a coerção deveria ocorrer durante todo o período da eleição para ter sucesso. A abordagem do Helios é que o último voto é sempre o válido para a eleição, de forma que se a eleição for feita em período de intervalo de dias, é difícil ter uma coerção de uma maioria significativa para o resultado. Dessa forma, essa abordagem visa apenas eleições onde o que está em jogo não é algo tão crítico, como uma votação para o presidente de um país.
- Não confie em ninguém para integridade, confie no Helios para privacidade: Criptossistemas de voto eletrônico possuem duas propriedades

que devem proteger, tanto a privacidade do voto, quanto a integridade. Num modelo de ataque onde todas as partes do sistema é corrompido e atacado, existe o entendimento que não há como proteger as duas coisas ao mesmo tempo. A abordagem do Helios acredita que é mais importante que a integridade seja garantida. Dessa forma, há a necessidade que um conjunto mínimo de administradores/apuradores sejam honestos para que a privacidade não seja comprometida, entretanto mesmo que todos apuradores sejam maliciosos, isso não afeta a parte de auditoria do sistema. Portanto há a necessidade de se confiar na infraestrutura do Helios para que a privacidade seja garantida.

4.3 PROCESSO DE VOTO

O primeiro passo é criar uma eleição, para isso, o usuário deve ter uma conta no Helios, que requer um email, nome e senha. O usuário pode então criar uma eleição com um determinado nome e define o período de votação. Desta forma o usuário que criou a eleição se torna um administrador da mesma. Uma vez que a eleição é criada, o Helios já provê todas as chaves criptográficas necessárias para o esquema. O administrador prepara então a cabine de votação com as perguntas e respostas, além de carregar todos os eleitores aptos para a eleição, essas informações podem ser editadas até o momento que a votação comece. O administrador deve congelar a eleição quando a mesma está pronta para receber os votos. Uma vez congelada, nada pode ser alterado sobre a cabine, votantes ou tempo da eleição.

Um outro usuário que foi adicionado como um eleitor pelo administrador, receberá em seu email o seu usuário da eleição, uma senha gerada aleatória que é específica para esta votação e um link para a cabine de votação online, além de um resumo criptográfico dos parâmetros da eleição para fins de auditoria. Assim que iniciar o processo de votação na cabine pelo link recebido, o mesmo faz a escolha de seus votos e por fim realiza uma revisão de suas decisões. Uma vez revisado a cédula de votação, ela é selada e então cifrada para enviar para o servidor.

Assim que o voto é cifrado, há a possibilidade do eleitor auditar o texto cifrado para verificar se realmente o seu voto foi computado corretamente. Entretanto uma vez que o voto cifrado é aberto, é necessário que seja cifrado novamente. Nesta hora é realizado o processo de autenticação do eleitor, caso a autenticação for um sucesso, a cédula é adicionada na eleição pelo servidor. Todos os votos são publicados em um boletim, que contém o identificador do votante junto com seu voto cifrado.

Quando a eleição acabar, o servidor embaralha todas as cédulas, cifra

todos os votos e coloca de modo público para as partes interessadas em auditar a votação. A auditoria permite verificar que o embaralhamento dos votos foi feito de maneira correta. Depois de um certo período de tempo, o Helios decifra as cédulas de votação e registra os votos. Qualquer pessoa pode baixar os dados gerados pela eleição para verificar que o embaralhamento, decifragem e contagem estão corretos.

Vale ressaltar aqui que o voto individual nunca é decifrado de maneira individual, uma vez que apenas os votos cifrados são encaminhados para o servidor, então é utilizado de criptografia homomórfica para combinar todos os votos cifrados em uma coisa só, a contagem, e apenas a contagem é decifrada, não revelando nenhuma informação adicional, a não ser pelo resultado.

4.4 INFORMAÇÕES RELEVANTES PARA AUDITORIA

O esquema proposto pelo Helios já provém diversas garantias para que sua auditoria seja realizada de forma transparente e aberta ao público. Disponibiliza diversos *endpoints* que fornecerem informações relevantes para a verificação da eleição. Como a lista dos eleitores aptos, de forma que essa lista pode ser por meios de pseudônimos para evitar a divulgação de informações, mas caso a lista seja pública, não há a necessidade de se utilizar pseudônimos. Todas as informações são disponibilizadas em formato JSON.

Exemplo de lista de eleitores

```
[
  {
    "id": "vinicius.macelai@gmail.com",
    "name": "Vinicius Macelai",
    "type": "email",
    "uuid": "60435862-65e3-11de-8c90-001b63948875"
  },
  {
    "id": "ben@adida.net",
    "name": "Ben2 Adida",
    "type": "email",
    "uuid": "4e8674e2-65e3-11de-8c90-001b63948875"
  }
  ...
]
```

Há também um *endpoint* que disponibiliza todas as questões da eleição, essa também é uma informação relevante para auditoria, visto que, uma vez publicado essas informações, teoricamente não deveria ser possível de se alterar qualquer dado de uma das questões. Sendo necessário guardar esse histórico para comparar com o que realmente aconteceu.

Exemplo da estrutura das questões

```
[
  {
    "answer_urls": [
      "",
      ""
    ],
    "answers": [
      "Sim",
      "Nao"
    ],
    "choice_type": "approval",
    "max": 1,
    "min": 0,
    "question": "Pergunta 1",
    "result_type": "absoluta",
    "short_name": "Pergunta 1",
    "tally_type": "homomorphic"
  },
  {
    "answer_urls": [
      "",
      ""
    ],
    "answers": [
      "Nao",
      "Sim"
    ],
    "choice_type": "approval",
    "max": 1,
    "min": 1,
    "question": "Segunda pergunta",
    "result_type": "absoluta",
    "short_name": "Segunda pergunta",
    "tally_type": "homomorphic"
  }
  ...
]
```

Já para os votos, há um outro *endpoint* que revela algumas informações sobre os votos, não há como acessar o voto de maneira clara, nem mesmo cifrado. Apenas é possível verificar a hora que foi votado, o hash do voto e do eleitor, e a identificação do eleitor. Isto é importante para verificar que um determinado foi computado e não excluído, além de ser possível, relacionar o identificador do eleitor na tabela de votantes, para saber que nenhuma pessoa que não era apta a votar, votou.

Exemplo da estrutura de um voto.

```
[
  {
```

```

    "cast_at": "2019-10-10 10:44:27.622007",
    "vote_hash": "ii3c1NdJarrMZ+du5t9xRe5m3+
    agnrm67YSsdIwPRHs",
    "voter_hash": "1
    HY5y0fXMqxapWNqCf82K2BpVrAWPKmtS9hN5YqL7jc",
    "voter_uuid": "c0157d63-b7a9-49e9-8021-9d35d3c83ea9"
  }
  ...
]

```

Para os dados gerais da eleição, há um *endpoint* que disponibiliza várias informações sobre a votação. Como o nome da votação, sua descrição, a hora que a eleição foi congelada para dar início aos votos, a sua chave pública que é utilizada na hora da verificação dos votos, hash dos eleitores, hora de início e fim da votação. São várias informações que são úteis em uma auditoria, pois é possível verificar se alguma coisa não aconteceu conforme o que o público geral esperasse.

```

{
  "cast_url": "https://e-democracia.ufsc.br/helios/elections
    /e64c77be-e6dd-11e9-9ed0-0050568db9bc/cast",
  "description": "",
  "frozen_at": "2019-10-10 13:56:23.825227+00:00",
  "name": "teste",
  "openreg": true,
  "public_key": {
    "g": "1488749222496318763428242153718604080130
    400801774349230448173738257193393756872447384
    710602991504015078403188220609028693866146445
    889649421527398954788920114485735261105857223
    657873431950512804260237286457042655085520144
    811174657987181124911478167430906269344244236
    869744997064823262188000170953514304791366143
    288328715000342980239222936158360868664324334
    972779197624724794861893042386618041055845827
    260662711127004009120307358023890530399447220
    293078320747239457849850776470319128824954765
    989999713116613025970060443389123229818234840
    317594745028443341126596678913102457362954604
    8637848902243503970966798589660808533",
    "p": "1632863208493301000238405503380545732960
    161477118595538973916730908621480040646579903
    858363495375294167564556218249812075026498049
    238137557936767564877129380031037096474576701
    424363851844255382397348299526730404432677704
    766295748026939132278937838461942859644644698
    469430618764476746246096562258008756433921263
    177581789595840901667639897567126617963789855
    768731707617721884323315069515788106125705301
    913307854592898356222139631316962247550981844
  }
}

```

```

266104701843626480690102396623671836720471075
593589901375030610773800236413791742659573740
387111418775080434656473125060919684663818390
3982387884578266136503697493474682071 ",
"q": "6132956624834290129254387276997895087063
3559608669337131139375508370458778917 ",
"y": "6674849462819707761425540060443321142147
065374239459835165544825432222893216813 43161
701912833679191861159511407066056382418705054
8693746028485084245830920486320377 0459478003
535479349067299809007231395222615550077332803
980377694907673841794062958485957445752678169
178233222755221822716717204325716622981245085
764017396596177317480111639095637201353649046
648287394475477034301481505230258754780469801
912243347674672857224825271821914019222712742
428353419223563690785390840589005731613775466
095536392298783449088276259415062502416297715
498188681306950146845971239763841785489152032
921279090551533346193693176660748711231231206 "
},
"short_name": "Teste_15",
"use_voter_aliases": true,
"uuid": "e64c77be-e6dd-11e9-9ed0-0050568db9bc",
"voters_hash": "4496c913e4202e7bd165a3c6457bbef71081c07b",
"voting_ends_at": "1570818542",
"voting_starts_at": "1570811298 "
}

```

Assim, o conjunto dessas informações, fornece uma transparência maior para o processo de votação, de forma que uma auditoria externa poderia verificar se houve alguma tentativa de manipulação da eleição.

O problema atual dessa abordagem usando exclusivamente o Helios, é que se um atacante consegue ter acesso ao servidor, consequentemente ele teria acesso ao banco de dados da aplicação, com isto, o atacante poderia modificar qualquer informação contida no mesmo. Por exemplo, a votação estava marcada para começar em determinada hora, como mostrado anteriormente, o Helios necessita que um administrador congele a eleição, de forma que nenhuma informação possa ser modificada, o atacante então altera o horário de congelamento para uma data futura, enquanto isso, ele pode realizar alterações nas configurações da votação, como a exclusão ou adição de eleitores, de modo malicioso.

5 DESENVOLVIMENTO

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

5.1 MODIFICAÇÃO DO SOFTWARE HELIOS

Como mostrado no capítulo anterior, o Helios fornece diversas informações relevantes para a auditoria de um processo de votação. Para acessar essas informações, foram criados *endpoints* para fornecer as informações, de forma que, apenas as relevantes são buscadas, evitando redundâncias e informações desnecessárias. Foi decidido de não alterar os *endpoints* originais para não causar uma perturbação no sistema. Os criados foram:

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

Já para os votos, não foi necessário nenhuma mudança no que já havia.

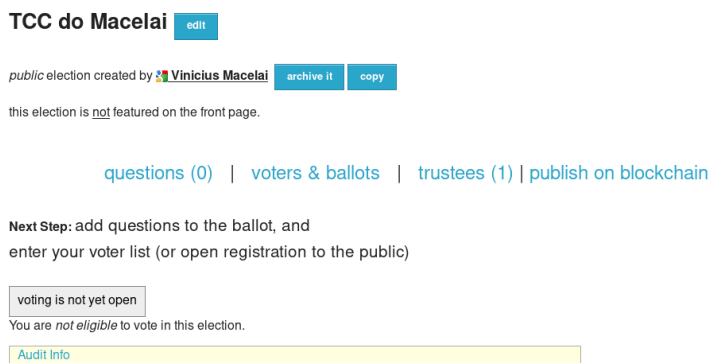


Figura 5 – Painel administrativo de uma eleição

TCC do Macelai

public election created by  **Vinicius Macelai** [archive it](#) [copy](#)

this election is not featured on the front page.

[questions \(2\)](#) | [voters & ballots](#) | [trustees \(1\)](#)

This election is complete. [publish result on blockchain](#)

Tally

Question #1
Pergunta 1

Sim	0
Nao	1

Question #2
Segunda pergunta

Nao	0
Sim	1

[Audit Info](#)

Figura 6 – Painel administrativo de 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 _releled_at) public {
26         releled_at = _releled_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    }

```

5.3 CUSTO FINANCEIRO

Nesta seção, estima-se os custos de transação cobrados para rodar na rede principal da *Ethereum*, de forma para rodar este protótipo. Primeira-

mente, é estimado o custo individual de cada contrato, já que cada um tem suas peculiaridades. Então é estimado e analisado em uma eleição hipotética com mil eleitores.

Considerando o preço do *Gas* utilizado em 25 *gwei*, e o preço de um *Ether* em 169 dólares em média. Dados obtidos 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

Agora, é estimado um processo de eleição para mil eleitores.

1. 1x construtor do contrato eleição.
2. 3x addQuestion do contrato eleição.
3. 1000x addVoter do contrato eleitores.
4. 1100x addVote do contrato votos.
5. 3x addQuestion do contrato resultado.
6. 1x setVotersHash do contrato resultado.
7. 1x setReleasedAt do contrato resultado.

Dando um total de **1248.54 Dólares**

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

Tabela 4 – Custos do contrato eleição

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvido um esquema e uma implementação de um módulo para garantir maior auditabilidade e transparência para o sistema de eleição online Helios, com a utilização da *blockchain* para garantir a imutabilidade dos dados inseridos.

Uma conclusão muito importante feito a partir da análise de custos do modelo proposto. Foi que há um custo relativamente elevado para rodar o modelo. Desta forma, dependendo do caso de uso da eleição, não há a necessidade de se ter tanta segurança no processo, de forma que o custo se torne incompatível com as necessidades. Entretanto, para votações onde já há um custo elevado para a realização da mesma, há a possibilidade de se alterar para utilização do Helios junto com módulo desenvolvido para se ter maior segurança para o processo de votação, sendo um caso de uso legítimo.

A pergunta da pesquisa pode ser respondida a partir dos dados obtidos do modelo construído, conjuntamente com as hipóteses propostas, de forma que foi criado um módulo utilizando *blockchain* para garantir auditabilidade. Foi feito estudo do custo para o volume de dados. Além de discutido se esse modelo é economicamente viável.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

A construção dos contratos inteligentes mostrou que há um custo muito alto associado aos contratos, de forma que a otimização dos mesmos possa reduzir o custo. Podendo ser otimizado de acordo com a necessidade do processo de votação, como excluir certas informações dos contratos. Outra coisa a ser levada em conta é a maturidade das linguagens de programação para os contratos, de forma que, com a maturidade dessas linguagens, poderá ser feito de maneira mais otimizada.

Outra possibilidade para a avaliação de redução de custos seria a utilização de outras *blockchains*, visto que, cada uma detém de características próprias, podendo reduzir o custo e possivelmente realizar uma abordagem mais completa do processo de auditoria.

Um aspecto não abordado nesse trabalho, é parte da verificação matemática dos votos. Como mostrado anteriormente, o Helios fornece todas as informações para uma auditoria externa, e nessa abordagem não lidamos com os votos cifrados. Um dos motivos é que a verificação é extremamente custosa computacionalmente e exige diversas manipulações dos dados. Além do mais, a linguagem utilizada na criação dos contratos inteligentes não tem

maturidade suficiente para ser possível realizar toda essa computação.

Uma abordagem mais completa ainda, seria a completa substituição do Helios por contratos inteligentes, de maneira que o contrato seria responsável por todas as partes do processo de votação, como a autenticação dos eleitores, além de fazer a contagem dos votos e divulgação dos resultados. Seria um modelo completamente descentralizado, trazendo diversas vantagens para o esquema, porém, com a imaturidade da tecnologia *blockchain* e de contratos inteligentes, isso se torna extremamente difícil no momento.

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>>.
- ADIDA, B. Helios: Web-based open-audit voting. In: . [S.l.: s.n.], 2008. p. 335–348.
- ANTONPOULOS, 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>>.
- GATHEN, J. **CryptoSchool**. [S.l.: s.n.], 2015.
- Halpin, H.; Piekarska, M. Introduction to security and privacy on the blockchain. In: **2017 IEEE European Symposium on Security and Privacy Workshops (EuroS PW)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–3.
- ISO17799. **ISO/IEC 17799 Tecnologia da informação — Técnicas de segurança — Código de prática para a gestão da segurança da informação**. [S.l.], 2005. v. 2005.
- 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.

APÊNDICE A – ARTIGO DO TCC

