**TECNOLOGIA ETHERVOLTZ PARA ELEIÇÕES AUDITÁVEIS.**

**Matheus Faria de Alencar, Marize Correa Simoes, Diógenes Ramos da Silva**

Faculdade ETEP/Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, Avenida Barão do Rio Branco, 882, Jardim Esplanada – 12242-800 - São José dos Campos-SP, Brasil, [mtsalenc@gmail.com](mailto:mtsalenc@gmail.com), [marize.simoes@etep.edu.br](mailto:2marize.simoes@etep.edu.br), [diogenes.silva@etep.edu.br](mailto:3diogenes.silva@etep.edu.br)

**Resumo -** Este artigo apresenta uma prova de conceito de sistema eleitoral independente de software que remove do administrador a responsabilidade de garantir a disponibilidade, integridade e confiabilidade dos registros digitais dos votos. O código é escrito na linguagem *Solidity* e posteriormente compilado para *bytecode* que pode ser interpretado pela máquina virtual da rede *Ethereum*. O resultado é a criação de uma criptomoeda que existe para representar cada voto, onde cada registro digital de voto fica gravado num banco de dados distribuído e que não está sob controle de uma entidade ou instituição única. O sistema é resistente a censura, ataques de negação de serviço e está sempre disponível para auditorias.

**Palavras-chave:** tecnologia, blockchain, ethereum, criptomoeda, ethervoltz.

**Área do Conhecimento:** Engenharia da Computação

**Introdução**

Em sistemas de votação de primeira, segunda e terceira geração (BRUNAZO, 2014), todas as provas geradas pelos votos ficam sob controle do administrador e precisam ser levadas dos locais de votação para as centrais de apuração dos votos. Além dos custos envolvidos para garantir que estes equipamentos não sejam alterados ou destruídos durante o transporte, o administrador também precisa guardar estes registros após a apuração de votos para auditorias.

Após o período eleitoral, caso um cidadão queira auditar os resultados das eleições, ele precisa interagir com o administrador do processo eleitoral para ter acesso os registros digitais, aos equipamentos e aos registros independentes de *software* (caso o administrador tenha optado por um sistema eleitoral independente de *software*). Cabe ao administrador decidir se ele tem ou não permissão para realizar a auditoria e quais são condições para a realização da mesma.

Os problemas deste tipo de centralização de poderes ficam evidentes nas eleições do Brasil. Embora não seja objetivo deste artigo discutir esses probemas, três casos são brevemente listados:

1. O Caso Marília, SP - 2004: Em auditoria, os Arquivos de Espelhos de Boletins de Urna da 400º Zona Eleitoral indicavam que muitas seções eleitorais tiveram seus resultados recebidos para apuração *antes* do início da votação (SÉRVULO et al., 2010);
2. O Caso Alagoas - 2006: Diversas irregularidades nos arquivos gerados pelas urnas foram detectadas por auditores externos. Frente as evidências, o administrador *negou* acesso aos arquivos solicitados pelos auditores e transferiu ao requerente uma cobrança antecipada no valor de R$ 2 milhões para que fosse desenvolvida uma perícia das urnas. Diante do não pagamento do valor proibitivo, o requerente foi multado e condenado por litigância de má-fé (SÉRVULO et al., 2010);
3. O Caso Itajaí, SC - 2008: Nenhuma urna preparada para a votação passou pelo teste obrigatório prescrito pelo Art. 32 da Res. TSE 22.712/08. Um caso foi o da 97ª Zona Eleitoral onde a urna da seção 236 que foi sorteada para o teste obrigatório foi substituída por outra na hora do teste, preparada exclusivamente para este fim. A urna que foi utilizada para o teste foi posteriormente colocada à parte e recarregada, procedimento que destruiu eventuais provas nela gravadas (SÉRVULO et al., 2010).

Em países como Alemanha, Argentina e Equador, que utilizam urnas mais modernas como as de segunda e terceira geração (BRUNAZO, 2014), o Princípio da Independência de Software em Sistemas Eleitorais (RIVEST; WACK, 2006) é preservado, entretanto, todas as provas geradas no momento do voto são controladas pelo administrador. Auditorias ocorrem apenas com a autorização e sob condições impostas pelo mesmo. O caminho do voto desde a urna até a apuração funciona como uma caixa preta em que o eleitor precisa confiar no administrador e em todos envolvidos no processo.

O objetivo do projeto é apresentar um modelo de sistema eleitoral que respeite o Princípio da Independência de Software em Sistemas Eleitorais e que decentralize o destino das provas geradas em cada voto, de forma que os registros físicos ficam sob custódia do administrador e os registros digitais ficam sob controle de um programa autônomo que pode ser auditado de sem a necessidade de interagir com o administrador.

**Material e Métodos**

Para o desenvolvimento do projeto, foram estabelecidos os seguintes requisistos:

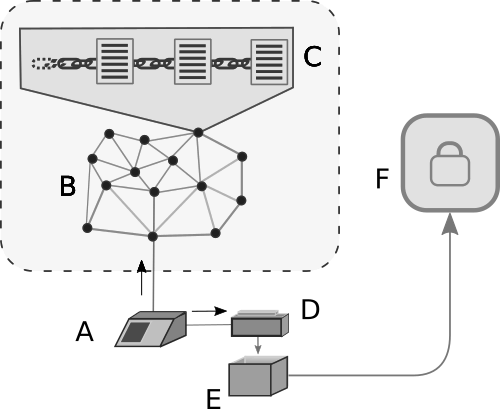
1. Velocidade de Apuração – O sistema precisa entregar velocidade de apuração igual ou superior a dos sistemas de votação atuais;
2. Disponibilidade – Os registros digitais de votos precisam estar armazenados em um sistema confiável, que seja resistente a ataques de negação de serviço e devem estar sempre disponíveis para auditorias;
3. Integridade – Os registros digitais dos votos precisam ser imunes a alteração não autorizada e *logs* de alterações executadas devem imutáveis e permantentes.
4. Decentralizado e Autônomo – Parte do software e infraestrutura utilizados não devem estar sob controle de uma autoridade central;
5. Independência de Software – Erros ou alterações não detectados no software do sistema não devem poder causar modificações ou erros indetectáveis no resultado final.

Para garantir os requisitos 1,3 e 4, foi adotada a estratégia de transformar cada voto em uma criptomoeda (CHOHAN, 2017) batizada de VoltToken, cujas regras de emissão e transferência são definidas em um contrato inteligente programado na linguagem *Solidity*. A linguagem *Solidity* é uma linguagem de alto nível similar ao javascript, orientada a contratos inteligentes e que é compilada para *bytecode* que a máquina virtual *Ethereum* é capaz de interpretar (REITWIESSNER et al., 2017).

Cada voto é uma transferência de uma carteira associada a uma determinada urna, para uma carteira associada a um determinado candidato. A apuração dos votos é um procedimento instantâneo e consiste em solicitar o balanço das carteiras associadas a cada candidato.

Para garantir o requisito 2, a plataforma e infraestrutura escolhida para hospedar o contrato inteligente é a máquina virtual *Ethereum* e a *rede peer-to-peer* formada pelos milhares de *nós* que possuem cópias do *blockchain* utilizado como banco de dados dos votos (WOOD, 2015). Como o código do contrato é aberto e as transações são asseguradas por criptografia de chaves assimétricas, um auditor pode verificar as regras de negócio do sistema e verificar a origem de todas as transações realizadas. De maneira similar a outras aplicações distribuídas como o *Bitcoin* (CHOHAN, 2017), a infraestutura não possui uma autoridade central com poder de emitir ou realizar transferências de VoltTokens de forma indetectável ou fora das regras de negócio definidas no contrato inteligente.

Figura 1 – Arquitetura do sistema



Fonte: O autor.

Na Figura 1, as letras representam respectivamente:

1. Um computador a sob controle do adminstrador que o eleitor usa para votar e que possui a chave privada da carteira associada à urna, capaz de assinar transferências de VoltTokenspara carteiras associadas a candidatos;
2. A rede *peer-to-peer* formada pelos milhares de nós e mineradores da rede *Ethereum.*
3. A cópia do *blockchain* *Ethereum* em um nó na rede;
4. Uma impressora para realizar a impressão de Votos Impressos Conferídos Pelos Eleitores (*VICE)* (BRUNAZO, 2014);
5. Uma caixa lacrada para a coleta dos *VICEs*;
6. Um cofre sob controle do adminstrador para armazenamento dos *VICE*.

Assim como nos sistemas de votação atuais, no EtherVoltz as chaves privadas que assinam cada voto estão sob controle do administrador, portanto estão sujeitas a ataques internos e externos que podem causar o vazamento das mesmas. De maneira similar, o *frontend* utilizado para interagir com a aplicação hospedada na rede *Ethereum* pode conter erros ou estar infectado com código malicioso capaz de fraudar votos.

Para garantir que não seja possível este tipo de vulnerabilidade ser explorada para a emissão de votos fraudulentos e válidos, é necessário que o sistema atenda ao Princípio da Independência de Software em Sistemas Eleitorais, que é o item 5 dos requisitos. A estratégia utilizada é a emissão de uma versão modificada da prova auditável pelo eleitor utilizada em urnas de 2ª geração. Inclui informações adicionais que criam um laço entre ela e o registro digital do voto no *blockchain*. Uma sugestão dessa prova é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – VICE do Ethervoltz



Fonte: O autor.

Cada transação confirmada e incluída em um bloco na rede *Ethereum*, produz um *hash* que a identifica de forma única (VOGELSTELLER et al., 2017). Uma busca com um explorador de blocos usando este *hash*, permite saber a chave pública que a assinou a transação e a chave pública da carteira destino. O EtherVoltz explora este fato para criar um laço entre as provas impressas e os registros digitais ao incluir este *hash* nos VICEs. Assim, auditando o *hash* de uma prova impressa, pode se descobrir de qual carteira de urna um determinado voto saiu e qual candidato recebeu o voto. Se a alguma informação retornada pela máquina virtual divergir do que está impresso no VICE, está configurada a fraude.

**Resultados**

Um sistema de votação independente de software e que grava os registros digitais de votos numa base de dados autônoma e resistente a censura. Foi escrito um contrato inteligente na linguagem *Solidity* utilizando o *framework* *Truffle*. Cada função criada possui testes unitários desenvolvidos utilizando *javascript*, as suites de asserção *mocha.js* e *chai.js* e o cliente RPC *testrpc* para a execução dos testes automatizados.

O contrato inteligente define as seguintes regras, que são imutáveis após hospedagem na rede:

* A transferência de VoltTokens *para candidatos* só pode ocorrer durante o período eleitoral, portanto, fraudes também só podem ocorrer neste intervalo;
* Apenas endereços de carteiras que representam candidatos podem receber VoltTokens no período eleitoral;
* O número total de VoltTokens em circulação é finito e definido no momento da criação do sistema;
* Nenhuma nova unidade da moeda pode ser emitida após a criação do sistema;
* Cada urna recebe precisamente o número de VoltTokens correspondente ao número de eleitores que devem votar naquela urna.
* O administrador só pode definir candidatos e urnas antes do período eleitoral.
* O administrador só pode distribuir VoltTokens às urnas antes do período eleitoral.

As regras anteriores são auditáveis por qualquer um através do código fonte do contrato disponibilizado pelo administrador. Todos os VoltTokens são rastreáveis desde o momento de sua emissão, portanto, roubos de votos ficam registrados permanentemente no blockchain assim como a origem e destino dos mesmos.

Após a execução de testes em ambiente controlado, a aplicação distribuída foi lançada na rede pública *Rinkeby* para testar o funcionamento na internet. Foram criados pares de chaves pública e privada para o administrador, Urnas A e B e Candidatos A e B. A Tabela 1 apresenta as chaves públicas dos atores relevantes da simulação de eleição realizada.

Tabela 1 – Chaves públicas das carteiras utilizadas.

|  |  |
| --- | --- |
| **Ator** | **Chave Pública** |
| Administrador | 0x51e6dd45486b5fafeda75595b7501891c9fc54e7 |
| Candidato A | 0x2ec72e4e7846e33bd0cc88cbaecdf4bb01bcd3ff |
| Candidato B | 0x2330d7654399d22a750bd22b8fc8501a347b7547 |
| Urna A | 0x0caa969e554a35f1176d739e384045691d21ee64 |
| Urna B | 0xdc2b8ea73104807285a3fad17c35dcc80e54ba46 |
| Contrato Inteligente | 0x063407a72493c8058b415f50076bc990c3927958 |

Fonte: O autor

Após a criação da aplicação na rede, o único endereço reconhecido pelo programa é o do administrador, que foi o criador do contrato. Foram enviadas transações assinadas com a chave privada do adminstrador para adicionar os endereços das urnas e dos candidatos, para que possam emitir e receber votos, respectivamente.

De maneira similar, após o lançamento da aplicação, o administrador possui custódia de todos os VoltTokens em circulação. Dos 500.000 VoltTokens criados, 20 foram transferidos para a Urna A e 5000 para a Urna B para que as urnas possam assinar transferências de suas próprias carteiras para as carteiras dos candidatos. Dentro do período eleitoral, as duas carteiras assinaram votos para cada candidato, como ocorreria em uma eleição real.

Com o explorador de blocos *rinkeby.etherscan.io*, foram adquiridas informações das transferências de VoltTokens realizadas. 7 destas transferências estão listadas Tabela 2 em ordem cronológica, sendo que as transferências mais recentes estão no topo. As duas primeiras são a distribuição de *tokens* realizada pelo administrador antes do período eleitoral e as demais são os votos realizados pelos eleitores dentro do período eleitoral.

Tabela 2 – Transferências de VoltTokens.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Tx Hash** | **De** | **Para** | **Quantidade** |
| 0xe7bc3eee0198af8... | 0x0caa969e554a35f... | 0x2330d7654399d2... | 1 |
| 0x53ff40ddba85bf4e... | 0xdc2b8ea7310480... | 0x2330d7654399d2... | 1 |
| 0xad7336b2cefad9e... | 0xdc2b8ea7310480... | 0x2330d7654399d2... | 1 |
| 0x4b41b2b901be65... | 0xdc2b8ea7310480... | 0x2330d7654399d2... | 1 |
| 0x3a131d962da6916... | 0xdc2b8ea7310480... | 0x2330d7654399d2... | 1 |
| 0x4d2c5eb13346c6... | 0x51e6dd45486b5fa... | 0x0caa969e554a35f... | 20 |
| 0xcd463fc2767af00... | 0x51e6dd45486b5fa... | 0xdc2b8ea7310480... | 5000 |

Fonte: O autor.

A coluna “Tx Hash” apresenta o *hash* de cada transação realizada e incluída em um bloco por um minerador da rede *Rinkeby*.

**Discussão**

Em sistemas eleitorais de primeira, segunda e terceira geração, todo o processo de auditoria precisa necessariamente envolver o administrador, já que este tem custódia de todas as provas do processo eleitoral. Já no sistema proposto, o administrador do sistema eleitoral não possui custódia nem do programa que realiza a transferência dos *tokens* que representam os votos e nem do banco de dados que armazena os registros digitais de voto. Consequentemente, parte da auditoria pode ocorrer sem a necessidade do envolvimento do administrador. De fato, utilizando apenas um navegador de blocos, qualquer pessoa pode analisar as transferências de VoltTokens em busca de endereços e carteiras que não foram anunciados em cerimônia oficial pelo administrador.

Uma auditoria de uma urna, poderia ser conduzida da seguinte forma:

1. O auditor utiliza um explorador de blocos como o *rinkeby.etherscan.io*, para analisar todas as transações realizadas pela urna que está sendo auditada;
2. O auditor solicita ao administrador da votação, a caixa contendo os votos impressos conferíveis pelo eleitor, da mesma urna;
3. O auditor compara as duas provas, em busca de provas inconsistentes.

Alguns exemplos de inconsistências nas provas, e que caracterizam fraudes são listados:

* O número de *VICE's* na caixa entregue pelo auditor é diferente do número de registros de voto digital retornados pela máquina virtual *Ethereum*;
* Algum registro digital de voto retornado pela máquina virtual Ethereum não possui seu *VICE* associado na caixa que o administrador entregou ao auditor;
* Algum *VICE* não possui um hash válido.

Um *hash* impresso no *VICE* é considerado válido se:

* Ele existir no blockchain *Ethereum*;
* O endereço do remetente for igual ao da urna que está sendo auditada;
* O endereço da carteira do candidato que recebeu o voto for o mesmo que o impresso no *VICE* correspondente;
* O endereço do contrato da criptomoeda for o mesmo que o publicado em cerimônia oficial.

**Conclusão**

EtherVoltz é uma proposta que visa decentralizar o processo eleitoral e de auditorias ao transferir a responsabilidade de gerenciar dos registros digitais de votos a um programa que executa em uma máquina virtual que não possui autoridade central, é imutável e resistente a censura. Ao transformar o voto do eleitor em uma criptomoeda, o sistema imediatamente ganha todas as propriedades de segurança do protocolo de consenso e de disponibilidade da rede *peer-to-peer* nativa da plataforma. Votos são finitos e cada voto é rastreável do candidato até a urna de onde partiu, garantindo o anonimato ao eleitor.

Embora ainda exista a necessidade da emissão e controle das provas impressas para garantir o Princípio da Independência de Software ao sistema, a separação do destino das duas provas produzidas no momento do voto dá aos eleitores poder de auditoria com limitada necessidade do envolvimento de intermediários.

**Referências**

BRUNAZO, A.F. **Modelos e Gerações dos Equipamentos de Votação Eletrônica**. Disponível em: <<http://www.brunazo.eng.br/voto-e/textos/modelosUE.htm>>. Acesso em: 27 jul. 2017.

CHOHAN, U.W. **Criptocurrencies**: A Brief Thematic Review. 2017. Disponível em: <<https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3024330>>. Acesso em: 13 ago. 2017.

VOGELSTELLER, F. et al. **Ethereum White Paper**. 2017. Disponível em: <<https://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper>>. Acesso em: 9 jul. 2017.

REITWIESSNER, C. et al. **Solidity Documentation**. 2017. Disponível em: <https://solidity.readthedocs.io/en/latest/>. Acesso em: 6 jun. 2017.

RIVEST, R.L.; WACK. J.P. **On the notion of “software independence“ in voting systems**. Cambridge, MA. MIT. 2006. Disponível em: <<https://people.csail.mit.edu/rivest/pubs/RW06.pdf>>. Acesso em: 22 jul. 2017.

SÉRVULO, S.S. et al. **1º Relatório do Comitê Multidisciplinar Independente**. 2010. Disponível em: <<http://www.votoseguro.org/textos/CMind-1-Brasil-2010.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

WOOD, G. **Ethereum**:A Secure Decentralised Generalised Transaction Ledger. Ethereum and Ethcore. Disponível em: <<http://www.cryptopapers.net/papers/ethereum-yellowpaper.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2017.