

Uma Análise Comparativa de Projetos de Moedas Digitais de Bancos Centrais baseadas em Tecnologias de Registros Distribuídos

A Comparative Analysis of Central Bank Digital Currency Projects based on Distributed Ledger Technologies

Matheus de S. L.
Fernandes
Programa de Pós-Graduação
Profissional em Engenharia Elétrica
(PPEE)
Universidade de Brasília (UnB)
Brasília, DF, Brasil
matheuslemosf@gmail.com

Carlo K. da S. Rodrigues
Centro de Matemática
Computação e Cognição
(CMCC)
Universidade Federal do ABC
(UFABC)
Santo André, SP, Brasil
carlo.kleber@ufabc.edu.br

William F. Giozza
Programa de Pós-Graduação
Profissional em Engenharia
Elétrica (PPEE)
Universidade de Brasília (UnB)
Brasília, DF, Brasil
giozza@unb.br

ABSTRACT

This study compares three Central Bank Digital Currency (CBDC) projects that utilize Distributed Ledger Technologies (DLTs), evaluating them across five key requirements: privacy, security, scalability, operational resiliency, and interoperability. This comparison is based on a literature review and interviews with Computer Science experts. Among the main findings, we found that the project prioritizing security demonstrates the most favorable outcomes. As its main contribution, this study provides a set of practical subsidies that may be potentially applied for project evaluation regarding the deployment of CBDC systems. Lastly, this article ends with general conclusions and key directions for future research.

CCS Concepts

•Networks → Network algorithms; Network algorithms; Network algorithms; Network design principles.

Keywords

Blockchain; CBDC; DLT; Security.

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. To copy otherwise, or republish, to post on servers or to redistribute to lists requires prior specific permission and/or a fee.

1. INTRODUÇÃO

Moedas Digitais de Bancos Centrais (CBDCs, do inglês *Central Bank Digital Currencies*) representam uma nova forma de

dinheiro emitido por bancos centrais, diferenciando-se das tradicionais moedas fiduciárias que correspondem às reservas de dinheiro físico [4].

As CBDCs podem ser classificadas nas seguintes duas categorias: (i) Atacado (do inglês, *Wholesale* CBDC – wCBDC) e (ii) Varejo (do inglês, *Retail/General* CBDC – rCBDC). A primeira é empregada para transações entre instituições financeiras. A segunda é destinada ao uso por indivíduos. Na maioria dos casos, as CBDCs são implementadas com Tecnologias de Registros Distribuídos (do inglês, *Distributed Ledger Technologies* – DLTs), sob conceitos de sistemas privados e permissionados, implicando que apenas participantes selecionados têm acesso à rede e realizam transações [4, 20].

A concentração de moedas digitais, e.g., Bitcoin, Ethereum e Solana, tem sido uma preocupação crescente para diversos países, uma vez que pode impactar a soberania financeira e a estabilidade dos sistemas monetários oficiais. Neste contexto, a adoção de CBDCs pode então representar uma vantagem estratégica para os bancos centrais desses países, ao oferecer uma alternativa digital mais segura e eficiente que as moedas digitais não públicas, promovendo, assim, maior formalização e controle sobre o sistema monetário desses países [31, 26]. Cada banco central, no entanto, enfrenta desafios específicos que influenciam a construção e a operacionalização de sistemas baseados em CBDCs, levando à busca por requisitos adaptados às suas necessidades particulares [19].

Uma vez que sejam implantados, os sistemas de CBDCs apresentam diversas vantagens em comparação aos sistemas tradicionais vigentes, incluindo, e.g., maior transparência nas transações financeiras, representação digital de ativos físicos, integração operacional do sistema financeiro, promoção da inclusão financeira e potencial otimização na implementação de políticas monetárias. Essas características tornam as CBDCs

19

uma ferramenta estratégica para modernização e aprimoramento da infraestrutura financeira [19]. Dentro deste contexto, este artigo tem como objetivo realizar uma análise comparativa de três conhecidos projetos de CBDCs baseados em DLTs: Jasper, Intahnon-LionRock e French Wholesale CBDC, todos utilizando *blockchains* privadas e permissionadas. Para tanto, é inicialmente feita uma revisão da literatura existente e, na sequência, são realizadas entrevistas com profissionais da área de Tecnologia da Informação (TI) com o intuito de capturar lições e conhecimentos advindos do uso prático de CBDCs. Decorre, portanto, que a principal contribuição deste estudo reside especialmente na identificação de subsídios teóricos e práticos que podem servir como alicerce para o desenvolvimento e avaliação de projetos de CBDCs a serem implantados por bancos centrais de diferentes países.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, são apresentados os fundamentos teóricos sobre o tema desta pesquisa. A Seção 3, discute a literatura relacionada. A Seção 4 detalha os três projetos de CBDCs analisados. Na Seção 5, realiza-se a comparação desses projetos. Por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

2. FUNDAMENTOS

2.1 Tecnologia de Registros Distribuídos

As DLTs podem ser definidas como tecnologias que permitem a construção de arquiteturas de banco de dados com armazenamento e o compartilhamento de registros de forma distribuída e descentralizada, garantindo sua integridade por meio de protocolos de validação baseados em consenso e assinaturas criptográficas [6]. Mais especificamente, em um sistema baseado em DLT (ou simplesmente sistema DLT), o controle sobre a estrutura de dados não é centralizado, mas sim realizado por um ou por todos os membros da rede, permitindo operações em ambientes onde não há confiança entre as partes, em contraste com bancos de dados tradicionais.

A categoria mais conhecida e amplamente utilizada de DLT é a Blockchain, que organiza os dados em blocos de transações interligados por *hashes* criptográficos. Essa estrutura sequencial torna extremamente custosa a alteração retroativa dos registros, conferindo à Blockchain a característica de ser uma lista imutável de registros [6]. Explica-se que a estrutura de dados (ou a base de dados) resultante do uso da Blockchain é aqui referida como *blockchain*.

Além da Blockchain, existem outras DLTs, como Tangle e Hashgraph, as quais utilizam grafos acíclicos direcionados para o armazenamento de dados, diferenciando-se pela estrutura de dados em relação à sequência linear da Blockchain. Além disso, algumas implementações permitem o uso de múltiplas *blockchains* dentro de um mesmo sistema, por meio das denominadas SideChains [15]. No entanto, dado que os projetos de CBDCs atualmente em desenvolvimento são predominantemente baseados em *blockchains*, tecnologias como Tangle, Hashgraph e SideChains não são abordadas neste estudo.

As DLTs também podem ser referir diretamente à base de dados concebida. A diferenciação do significado é feita a partir do

contexto. No caso de DLTs significando a base de dados construída, há duas formas de classificação, com base no nível de acesso, podendo ser públicas ou privadas. Em uma DLT pública, qualquer usuário da rede pode visualizar os registros, enquanto, em uma DLT privada, o acesso aos registros é restrito a um grupo seleto de usuários [6, 5]. Além disso, a classificação das DLTs pode ser feita segundo o controle de acesso aos registros, dividindo-as em permissionadas e não permissionadas. Em DLTs permissionadas, um grupo de usuários confiáveis é responsável por validar ou alterar os registros na rede, enquanto, em DLTs não permissionadas, qualquer usuário pode validar os registros, sem a necessidade de uma parte centralizadora [6, 5].

Ressalta-se que este estudo se concentra exclusivamente nas DLTs do tipo Blockchain, com foco nas versões privada e permissionada e abordando como essas tecnologias podem ser aplicadas para projetos de CBDCs.

2.2 Algoritmos de consenso

Os algoritmos de consenso são pilares para o funcionamento das DLTs, permitindo que as redes descentralizadas cheguem a um acordo sobre a validade dos registros. Esses algoritmos podem ser classificados em duas categorias principais: baseados em prova e baseados em voto [24, 17]:

- Baseados em Prova (Proof-Based): Nesta categoria, atinge-se consenso quando um membro da rede, após realizar um determinado trabalho computacional, adquire o direito de adicionar um novo bloco à rede. Esses algoritmos são predominantemente utilizados em DLTs públicas, onde é possível adicionar novos participantes sem restrições de identidade, operando em um ambiente descentralizado. Entre os algoritmos baseados em prova mais conhecidos, destacam-se o Proof-of-Work (PoW), Proof-of-Stake (PoS) e Delegated-Proof-of-Stake (DPoS) [24, 17].
- Baseados em Voto (Voting-Based): Nesta categoria, atinge-se consenso quando, após a troca de mensagens entre os participantes, há uma concordância sobre a validade dos registros. Devido à necessidade de gerenciar a identidade dos participantes, esses algoritmos são mais adequados para redes privadas. Exemplos desses algoritmos incluem aqueles tolerantes a falhas bizantinas, e.g., o Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), Stellar e Ripple [24, 17].

Explica-se que este trabalho se concentra exclusivamente nos algoritmos de consenso baseados em voto, pois esta é a única classe de algoritmos utilizada nos projetos de CBDC atualmente em desenvolvimento. O objetivo é analisar as características desses algoritmos e sua aplicação no contexto das CBDCs, conforme evidenciado pela literatura existente.

2.3 Plataforma de DLT

As diferentes características das diversas categorias de DLTs permitiram o desenvolvimento de uma variedade de plataformas, cada uma voltada para atender a casos de uso específicos, como cadeias de suprimentos, Internet das Coisas (IoT), gerenciamento de identidade e, mais recentemente,

CBDCs. Essas plataformas variam conforme o nível de acesso à base de dados construída com DLT, podendo ser públicas ou privadas, e também de acordo com o modelo de permissão para validar registros, sendo classificadas como permissionadas ou não permissionadas [11, 32].

Plataformas de DLT não permissionada, como Bitcoin e Ethereum [23, 13], são amplamente conhecidas e utilizadas em contextos que exigem redes descentralizadas e abertas. Em contrapartida, plataformas permissionadas, como Hyperledger Fabric e Corda, são preferidas para casos em que o controle de acesso e a confiabilidade entre participantes são essenciais, como é o caso dos projetos de CBDCs [11].

Como já informado, este trabalho foca exclusivamente em plataformas permissionadas, pois, conforme a literatura existente, são essas plataformas que estão sendo escolhidas para a implementação de projetos de CBDCs.

2.4 Requisitos Funcionais

A construção de projetos de CBDCs é um objetivo almejado por diversos países ao redor do globo. Os requisitos funcionais que devem ser atendidos por esses projetos, no entanto, diferem entre países. Privacidade e segurança são alguns objetivos cruciais para a construção de alguns projetos de CBDC, assim como resiliência operacional, escalabilidade e interoperabilidade [31, 30, 21].

Neste contexto, os projetos de CBDC devem satisfazer pelo menos os requisitos funcionais definidos na Tabela 1. Na prática, contudo, não há ainda um único projeto de CBDC que consiga satisfazer todos esses requisitos. Além disso, também é essencial avaliar a relevância desses requisitos funcionais. Essa avaliação permite determinar a importância relativa de cada requisito no contexto de um sistema distribuído. Para tanto, com base nesse entendimento, é possível atribuir pesos a cada requisito funcional, conforme descrito na Tabela 2, possibilitando uma análise mais precisa e estruturada dos projetos estudados [31, 30, 21].

3. TRABALHOS RELACIONADOS

Diversos países têm conduzido estudos teóricos e práticos sobre projetos de CBDCs baseados em DLTs. Alguns desses projetos já avançaram para fases de validação prática, demonstrando o interesse crescente na exploração de suas aplicações e impactos. Neste contexto, esta seção apresenta uma discussão breve de seis projetos-piloto de CBDCs, destacando suas características e progressos.

O Projeto Jasper, descrito em [10, 27], é uma prova de conceito para wCBDC desenvolvida no Canadá. Esse projeto utiliza uma *blockchain* permissionada para facilitar transações de grande valor entre bancos e instituições financeiras. Focado em escalabilidade e resiliência operacional, o projeto adota a plataforma de código aberto Corda, desenvolvida pela R3, cuja escolha foi motivada pela capacidade de validar transações em tempo real, eliminando a necessidade de algoritmos de consenso de alto custo, como o PoW. Os resultados da terceira fase do piloto demonstram que a CBDC tem potencial para atuar como um sistema eficiente de liquidação de pagamentos e títulos, preservando a segurança e escalabilidade, requisitos essenciais para partes interessadas. O Projeto Ubin, descrito em [22], representa uma prova de conceito de wCBDC desenvolvida

por meio de uma colaboração entre a Autoridade Monetária de Singapura (MAS), o banco J.P. Morgan, e as empresas Temasek e Accenture. Baseado em *blockchain* permissionada voltada para o uso empresarial, o projeto foi implementado na plataforma Quorum. Seu principal objetivo é reduzir custos operacionais em transações internacionais entre instituições financeiras, além de promover maior interoperabilidade entre plataformas de DLT, aumentar a eficiência e resiliência operacional e aprimorar a transparência nas transações, mitigando riscos de operações fraudulentas. Os resultados obtidos destacam a capacidade da CBDC de integrar-se facilmente a outras plataformas, como o sistema Jasper, desenvolvido pelo Banco do Canadá.

O projeto Inthanon-LionRock, descrito em [7], é uma iniciativa conjunta dos bancos centrais da Tailândia e de Hong Kong para o desenvolvimento de wCBDC. Utilizando uma infraestrutura baseada em DLT, o projeto busca viabilizar transações transfronteiriças mais rápidas e seguras em comparação aos sistemas tradicionais. A tecnologia empregada é *blockchain* permissionada implementado na plataforma Hyperledger Besu. Entre os requisitos principais, destacam-se a interoperabilidade, escalabilidade, alto desempenho, alta disponibilidade e privacidade no ecossistema de transações. Os resultados demonstram que o projeto oferece alta escalabilidade, resiliência operacional e eficiência na recuperação de desastres, características atribuídas à arquitetura em nuvem utilizada na sua implementação.

Em [25], os autores analisam a viabilidade da implantação da CBDC do Brasil, denominada à época Real Digital (atualmente denominada Drex [3]), com base em pesquisas realizadas junto a especialistas do setor financeiro, enfocando aspectos de escalabilidade e privacidade. O projeto-piloto do Real Digital foi implementado utilizando *blockchain* permissionada, por meio da plataforma Hyperledger Besu [3]. Os resultados apontam um significativo interesse do setor financeiro, embora os resultados técnicos da implantação ainda não tenham sido divulgados oficialmente pelo Banco Central do Brasil.

O eNaira, descrito em [29], é um projeto de rCBDC implementado em escala nacional pelo governo da Nigéria. O projeto utiliza o *Digital Currency Management System* (DCMS), uma solução proprietária de *blockchain* permissionada construída sobre a plataforma de código aberto Hyperledger Fabric. Essa abordagem permite evitar uma descentralização descontrolada e garantir a governança pelas instituições responsáveis [29]. O sistema foi desenvolvido para abordar questões críticas no contexto financeiro do país, como a inclusão digital e o envio de remessas internacionais. Após a primeira fase do projeto piloto, verificou-se a manutenção de resiliência operacional 24 horas por dia ao longo do período, embora com volumes de transações semanais ainda modestos.

O projeto piloto do French Wholesale CBDC, descrito em [14], é uma iniciativa do Banco da França (Banque de France) para o desenvolvimento de uma Moeda Digital de Banco Central (CBDC) de atacado. Baseado em uma tecnologia de *blockchain* permissionada denominada DL3S, desenvolvida especificamente para o projeto, o sistema foi construído sobre a plataforma de código aberto Hyperledger Fabric. Entre os principais objetivos estão a promoção da interoperabilidade

com outras plataformas de DLT na zona do Euro, a integração com sistemas privados e a eficiência energética (em resposta a preocupações climáticas). Os resultados alcançados demonstram interoperabilidade bem-sucedida entre plataformas de DLT e integração com sistemas não baseados em DLT, além de possibilitar a liquidação de ativos em questão de segundos.

Ante o exposto e conforme a síntese na Tabela 4, pode-se inferir que: (i) os requisitos funcionais desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de projetos de CBDCs; (ii) há grande destaque da relevância da segurança e da resiliência operacional, conforme explorado também em [31, 28]; (iii) os projetos-pilotos têm se concentrado no uso da tecnologia Blockchain; (iv) a importância de cada requisito

funcional varia entre os projetos. Por exemplo, enquanto a escalabilidade pode ser um fator crítico para determinados sistemas, privacidade e resiliência operacional assumem maior relevância em outros contextos.

Por fim, este trabalho de pesquisa inova ao fazer uma análise comparativa específica, considerando requisitos funcionais, entre os seguintes três projetos: Jasper, InthanonLionRock e French Wholesale CBDC. A escolha desses projetos, como já mencionado, se deve ao fato de serem os projetos de melhor documentação disponível e por utilizarem *software* de código aberto em suas tecnologias subjacentes.

Tabela 1: Requisitos funcionais.

Requisito	Significado
Privacidade	A capacidade de um indivíduo determinar por si só até que ponto informações pessoais são compartilhadas com outras pessoas [12].
Segurança	A capacidade de proteger computadores e outros aparatos computacionais de possíveis ameaças digitais [2].
Escalabilidade	A medida da capacidade de um sistema computacional de aumentar ou diminuir o desempenho em resposta a mudanças na demanda de aplicações [18].
Resiliência operacional	A capacidade de uma organização de prevenir, detectar, responder a e recuperar-se de interrupções operacionais, garantindo a continuidade e estabilidade dos negócios [16].
Interoperabilidade	A capacidade de sistemas de trocar dados e informações de maneira segura e automática, utilizando padrões, protocolos e tecnologias comuns para permitir a interação entre sistemas diferentes [1].

Tabela 2: Pesos para os requisitos funcionais.

Requisito	Peso
Privacidade	5
Segurança	5
Escalabilidade	4
Resiliência operacional	4
Interoperabilidade	3

Tabela 3: Glossário

Sigla	Significado
CBDC	Central Bank Digital Currency
DL3S Settlement System	[1] Distributed Ledger for Securities
DLT	Distributed Ledger Technology
DPoS	Delegated Proof-of-Stake
IoT	Internet-of-Things
PBFT	Practical Byzantine Fault Tolerance
PoS	Proof-of-Stake
PoW	Proof-of-Work
rCBDC	Retail CBDC
wCBDC	Wholesale CBDC

4. PROJETOS SOB ANÁLISE

Esta seção apresenta os três projetos de CBDCs de atacado destacados ao final da Seção 3, cujos objetivos incluem a integração entre a infraestrutura bancária existente e uma plataforma baseada em Tecnologias de Registro Distribuído (DLT). Além disso, busca-se identificar os requisitos funcionais mais relevantes de cada projeto, com o propósito de destacar

quais características das DLTs subjacentes são mais desejáveis na implementação de uma CBDC, considerando as necessidades e objetivos dos bancos centrais. O objetivo desta seção é identificar, nos projetos de CBDC, os requisitos funcionais mais relevantes de cada projeto, de modo a esclarecer quais características presentes nas DLTs subjacentes são mais desejadas na implementação de um projeto de CBDC.

4.1 Jasper

O projeto Jasper, desenvolvido pelo Banco do Canadá, é uma iniciativa de wCBDC, projetada para facilitar transações entre instituições financeiras. O estudo tem o objetivo de avaliar a viabilidade de utilizar DLTs como alternativa ao sistema centralizado de pagamentos atualmente empregado no país, o *Large Value Transfer System* (LVTS) [10]. O LVTS, que opera como um Sistema de Liquidação Bruta em Tempo Real (*Real-Time Gross Settlement* – RTGS), processa transações de grandes valores entre instituições financeiras, entre elas o Depositário Canadense de Valores Mobiliários

(*Canadian Depository for Securities* - CDS). Embora os sistemas RTGS sejam eficazes em reduzir os riscos à liquidez, enfrentam limitações em ambientes onde a liquidez constante não pode ser garantida, exigindo o uso de Mecanismos de Economia de Liquidez (Liquidity Saving Mechanisms – LSMs). Os LSMs, no entanto, são majoritariamente centralizados, pois dependem de uma infraestrutura que consolida transações para liquidar apenas os valores líquidos entre as partes periodicamente. O projeto Jasper inova ao propor um sistema RTGS descentralizado utilizando tecnologia DLT, sendo a plataforma Corda a escolhida para implementação.[10, 27].

Tabela 4: Síntese de Projetos de CBDCs.

Referências	Nome	Ano	Tecnologia	Controle de acesso	Algoritmos de consenso	Plataforma
[10, 27]	Jasper	2017	Blockchain	Permissionada	PBFT, BFT-SMaRt, RAFT	Corda
[22]	Ubin	2020	Blockchain	Permissionada	IBFT, RAFT	Quorum
[7]	Inthanon-LionRock	2021	Blockchain	Permissionada	IBFT	Hyperledger Besu
[25, 3]	Real Digital	2023	Blockchain	Permissionada	QBFT	Hyperledger Besu
[29]	eNaira	2023	Blockchain	Permissionada	RAFT, PBFT	Hyperledger Fabric
[14]	French Wholesale CBDC	2023	Blockchain	Permissionada	RAFT, PBFT	Hyperledger Fabric

A prova de conceito do projeto combina operações dentro e fora da DLT. Transações, como compras, são inicialmente recebidas por meio da infraestrutura bancária tradicional fora da DLT e, em seguida, geram solicitações de compra e venda na plataforma descentralizada. Essas solicitações são processadas dentro da DLT, onde as posições financeiras ou patrimoniais são transferidas entre as partes por meio de operações atômicas executadas com contratos inteligentes (do inglês, *smart contracts*) da plataforma Corda (também referenciada como o *broker*). Após o processamento, as transferências de dinheiro ou patrimônio são concluídas fora da DLT para as partes envolvidas. [27]. A Figura 1 exemplifica o objetivo do processo descrito de liquidação conduzido por este projeto de CBDC.

O projeto busca criar uma plataforma RTGS que ofereça resiliência operacional e privacidade. Entretanto, a presença de elementos centralizados, como o nó notário (do inglês, *notary node*) da plataforma Corda, apresenta desafios para a obtenção de uma resiliência operacional plena. Além disso, a privacidade é uma característica fundamental em um sistema onde a divulgação de transações pode proporcionar vantagens indevidas, destacando a importância de mitigar esses riscos no desenvolvimento de uma solução descentralizada robusta.

4.2 Inthanon-LionRock

O projeto Inthanon-LionRock é uma iniciativa conjunta dos bancos centrais de Hong Kong e Tailândia, voltada ao desenvolvimento de um projeto de wCBDC destinada a transações interbancárias entre os bancos centrais dos países participantes [7]. O principal objetivo do projeto é reduzir os custos operacionais e o tempo necessário para a conclusão dessas transações, atualmente caracterizadas pela dependência de múltiplos intermediários ao longo do processo. A Figura 2 mostra como o projeto busca modificar o modelo corrente.

O projeto adota uma arquitetura de três camadas, composta por uma camada de interação com a DLT, uma camada de

backend e uma camada de clientes. A camada de interação com a DLT utiliza as ferramentas da plataforma Hyperledger Besu para realizar todas as operações baseadas em Blockchain. Sobre essa camada, encontra-se a camada de *backend*, que fornece uma API para permitir o acesso à Blockchain, além de realizar a gestão de identidades e o monitoramento em tempo real. Por fim, a camada de clientes constitui a interface de acesso dos usuários, possibilitando uma conexão segura com a camada de *backend* e, conseqüentemente, com as funcionalidades da plataforma [7].

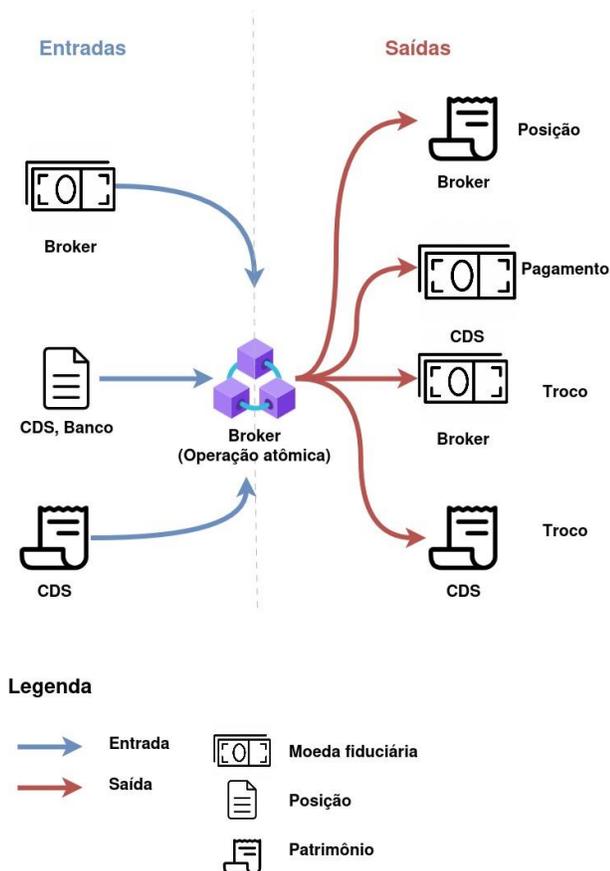


Figura 1: Processo de liquidação de posição de forma atômica por meio da plataforma Corda.

O projeto Inthanon-LionRock adota um mecanismo híbrido para a liquidação de transações, que difere dos sistemas tradicionais de RTGS ou dos mecanismos de *Deferred Net Settlement* (DNS), que processam transações em períodos predeterminados. Em vez disso, o projeto utiliza Mecanismos de Economia de Liquidez (do inglês *Liquidity Saving Mechanism* - LSM) e filas de processamento para lidar com diferentes tipos de transações de maneira eficiente.

Os resultados obtidos na implementação indicam que a arquitetura proposta alcança escalabilidade e resiliência operacional, atendendo aos requisitos essenciais para um sistema robusto. Além disso, a privacidade, identificada como uma característica desejável, permanece como foco para desenvolvimento em futuras fases do projeto [7].

4.3 French Wholesale CBDC

O French Wholesale CBDC é um projeto de wCBDC desenvolvido pelo Banco da França voltado à tokenização de ativos e pagamentos transfronteiriços [14]. A iniciativa baseia-se nos aprendizados obtidos a partir de outros experimentos com CBDCs, como o Projeto Jura, que investigou a interoperabilidade entre plataformas distintas operando em redes separadas [9], e o Projeto Mariana, que testou um modelo alternativo de interoperabilidade, permitindo a transação de múltiplas wCBDCs em uma única rede transnacional por meio de um padrão técnico uniforme [14, 8].

O projeto investiga diferentes modelos para a oferta de wCBDCs, incluindo o modelo de interoperabilidade, o modelo de distribuição e o modelo de integração. No modelo de interoperabilidade, cada entidade participante utiliza sua própria plataforma de DLT, e as transações ocorrem simultaneamente nessas plataformas, permitindo a transferência de valores entre carteiras sem a necessidade de interação direta entre as plataformas. O modelo de integração, por sua vez, baseia-se na utilização de uma única plataforma de DLT para todas as transações, exigindo que os participantes adotem os padrões e protocolos estabelecidos, possibilitando que bancos transacionem moeda e ativos utilizando uma mesma CBDC na Zona do Euro. Já o modelo de distribuição combina uma plataforma comum de DLT com pontes de integração, permitindo que as plataformas individuais de DLT de cada banco central se conectem à DLT centralizada, de modo que todas as transações sejam processadas em uma plataforma compartilhada após a emissão inicial dentro de cada CBDC participante. [14].

Cada modelo apresenta vantagens sob diferentes perspectivas, mas nenhum atende integralmente a todos os requisitos funcionais identificados. Entre as capacidades destacadas estão escalabilidade, programabilidade e segurança, as quais variam conforme a DLT subjacente utilizada. Para fins de análise comparativa, será explorado o modelo de integração, uma vez que sua proposta se assemelha aos projetos Jasper e Inthanon-LionRock discutidos anteriormente. Esse modelo adota a plataforma proprietária DL3S, construída com base na plataforma de código aberto Hyperledger Fabric. [14]. A Figura 3 apresenta simplificada o funcionamento deste projeto de CBDC.

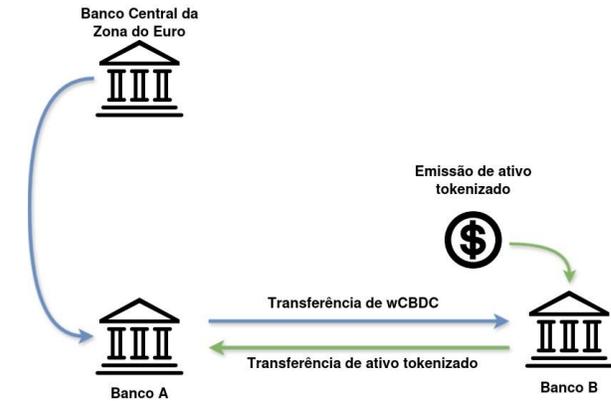
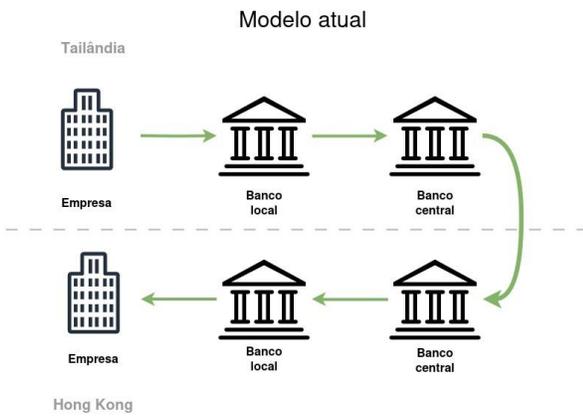


Figura 3: Exemplo de operação do modelo de integração no French Wholesale CBDC, como descrito em [14].

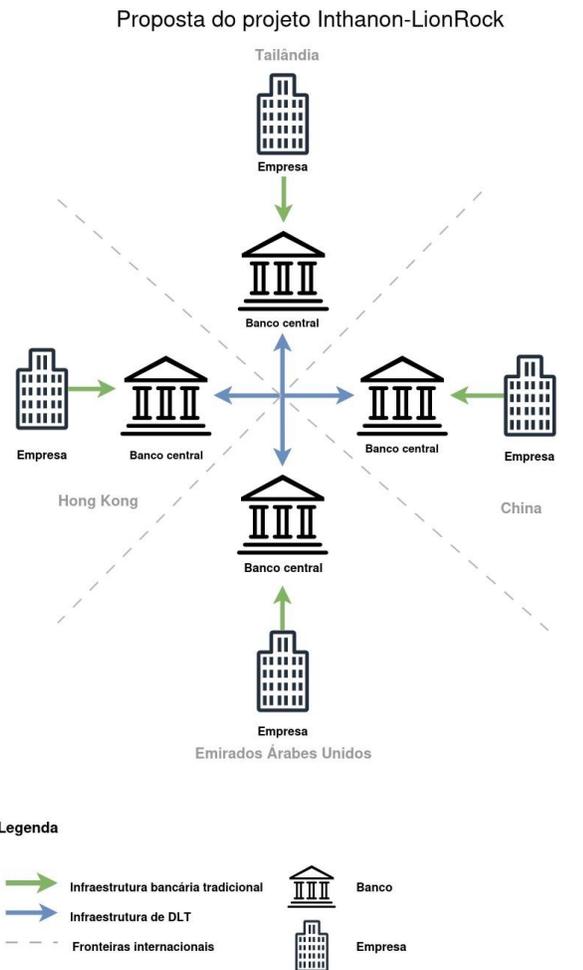


Figura 2: Comparação dos modelos de operação atuais e o proposto pelo projeto Inthanon-LionRock.

5. AVALIAÇÃO COMPARATIVA

Esta seção apresenta uma avaliação comparativa dos projetos de CBDCs previamente selecionados, estruturada em duas subseções. A Subseção 5.1 realiza a análise com base em estudos disponíveis na literatura, enquanto a Subseção 5.2 incorpora perspectivas obtidas a partir da opinião de profissionais da área de tecnologia da informação.

5.1 Trabalhos da Literatura

A Tabela 5 apresenta os requisitos funcionais identificados em cada um dos três projetos de projeto de CBDCs sob análise. A pontuação obtida por cada projeto, S_j , para $j = 1, \dots, 3$, é calculada pela Fórmula (1) onde: p_i é o peso do requisito i , para $i = 1, \dots, n$, e $n = 5$ é a quantidade total de requisitos.

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n} \quad (1)$$

obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 7. Dá, este CBDC também é a opção mais recomendável em acordo com as

Tabela 5: . Requisitos funcionais apresentados por cada projeto de CBDC.

Nome do projeto	Escalabilidade	Interoperabilidade	Privacidade	Resiliência	Segurança
Jasper	x		x	x	
Inthanon-Lionrock	x		x	x	
French Wholesale CBDC (integração)	x		x		x

Os valores das pontuações estão informados na Tabela 6.

Tabela 6: . Pontuação alcançada por cada projeto de CBDC.

Nome do projeto	Pontuação
Jasper	4,3
Inthanon-Lionrock	4,3
French Wholesale CBDC	4.7

Com base nas pontuações obtidas e considerando os pesos e critérios previamente estabelecidos, o French Wholesale CBDC apresenta a maior pontuação em comparação aos outros dois projetos de CBDCs analisados, como verificado na Tabela 6. Dá, este CBDC é a opção mais recomendável em acordo com a literatura.

5.2 Entrevistas

Além da análise da literatura apresentada na Seção 3, foram realizadas entrevistas com nove profissionais da área de tecnologia para avaliar a importância dos requisitos funcionais no contexto de sistemas computacionais distribuídos. Os resultados, apresentados no gráfico da Figura 4 destacam a segurança como o requisito de maior relevância, seguida por resiliência operacional, escalabilidade, privacidade e interoperabilidade.

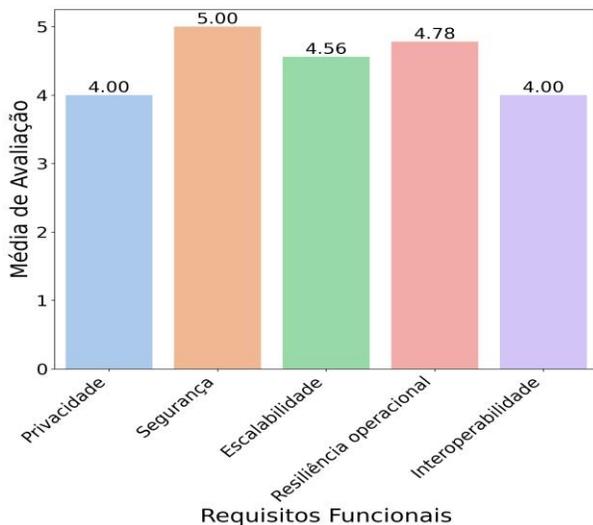


Figura 4: Média das avaliações em entrevistas

Com base nesses resultados e aplicando a fórmula descrita em 1, utilizando os mesmos pesos definidos na Tabela 2,

entrevistas.

Nome do projeto	Pontuação
Jasper	4,45
Inthanon-Lionrock	4,45
French Wholesale CBDC	4,52

Tabela 7: Pontuação alcançada por cada projeto de CBDC com pesos das entrevistas

5.3 Síntese dos Resultados

Finalmente, a partir do discutido nesta seção, considerando as duas conclusões parciais alcançadas, sob o ponto de vista da análise da literatura e das entrevistas, pode-se concluir finalmente que O CBDC French Wholesale é a melhor opção. Destaca-se que essa condição favorável se deve especialmente pela importância dada ao requisito de segurança.

6. CONCLUSÕES FINAIS

Neste artigo foi realizada uma comparação entre três projetos de CBDC considerando os requisitos funcionais buscados por cada um, bem como foram realizadas entrevistas com profissionais de tecnologia para avaliar a importância desses requisitos.

Dentre os principais resultados alcançados, a comparação realizada permitiu concluir que o projeto French Wholesale CBDC, que prioriza a segurança como um requisito essencial em sua construção, se destacou dentre os três projetos por ter obtido a maior pontuação. Ademais, as entrevistas mostraram que os requisitos escolhidos de cada projeto estão aderentes às respectivas propostas, evidenciando que os requisitos de segurança, escalabilidade e resiliência operacional são considerados mais importantes que os requisitos de privacidade e interoperabilidade.

Por fim, para trabalhos futuros, é sugerida uma investigação mais aprofundada de outros projetos de CBDC de relevância, incluindo o Drex [25, 3], eNaira [29] e Projeto Ubin [22], que se encontram em diferentes fases desenvolvimento. No presente momento, a escassez de referências disponíveis dificultou uma análise mais detalhada sobre esses projetos neste estudo.

7. REFERÊNCIAS

- [1] AWS. O que é interoperabilidade?, 2024. <https://aws.amazon.com/pt/what-is/interoperability/>.
- [2] AWS. O que é segurança cibernética?, Oct. 2024. <https://aws.amazon.com/pt/what-is/cybersecurity/>.

- [3] Banco Central do Brasil. Arquitetura do piloto do Real Digital, 2023. <https://github.com/bacen/pilotord-kitonboarding/blob/main/arquitetura.md>.
- [4] C. Barontini and H. Holden. Proceeding with caution-a survey on central bank digital currency. *Proceeding with Caution-A Survey on Central Bank Digital Currency (January 8, 2019)*. *BIS Paper*, (101), 2019.
- [5] R. Belchior, A. Vasconcelos, S. Guerreiro, and M. Correia. A survey on blockchain interoperability: Past, present, and future trends. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54(8):1-41, 2021.
- [6] E. Benos, R. Garratt, and P. Gurrola-Perez. The economics of distributed ledger technology for securities settlement. *Available at SSRN 3023779*, 2017.
- [7] BIS Innovation Hub Hong Kong Centre, Hong Kong Monetary Authority, Bank of Thailand, Digital Currency Institute of the People's Bank of China, and entral Bank of the United Arab Emirates. Inthanon-LionRock to mBridge: Building a multi CBDC platform for international payments. Sept. 2021.
- [8] BIS Inovation Hub, Banque de France, Monetary Authority of Singapore, and Swiss National Bank. Project mariana: Cross-border exchange of wholesale cbdc using automated market-makers, 2023.
- [9] C. Boar, S. Claessens, A. Kosse, R. Leckow, and T. Rice. *Bis bulletin*. 2021.
- [10] J. Chapman, R. Garratt, S. Hendry, A. McCormack, and W. McMahon. Project Jasper: Are distributed wholesale payment systems feasible yet. *Financial System*, 59:59, 2017.
- [11] M. J. M. Chowdhury, M. S. Ferdous, K. Biswas, N. Chowdhury, A. Kayes, M. Alazab, and P. Watters. A comparative analysis of distributed ledger technology platforms. *IEEE Access*, 7:167930-167943, 2019.
- [12] Cloudflare. O que é privacidade de dados. <https://www.cloudflare.com/ptbr/learning/privacy/wh-at-is-data-privacy/>.
- [13] C. Dannen. *Introducing Ethereum and solidity*, volume 1. Springer, 2017.
- [14] B. de France and others. Wholesale Central Bank Digital Currency Experiments with the Banque de France: New insights and key takeaways. July 2023. Publisher: Banque de France.
- [15] N. El Ioini and C. Pahl. A review of distributed ledger technologies. In *On the Move to Meaningful Internet Systems. OTM 2018 Conferences: Confederated International Conferences: CoopIS, C&TC, and ODBASE 2018, Valletta, Malta, October 22-26, 2018, Proceedings, Part II*, pages 277-288. Springer, 2018.
- [16] Elastic. O que é a resiliência operacional?, 2022. <https://www.elastic.co/pt/what-is/operationalresilience>.
- [17] X. Fu, H. Wang, and P. Shi. A survey of blockchain consensus algorithms: mechanism, design and applications. *Science China Information Sciences*, 64:1-15, 2021.
- [18] Garner. Scalability, 2024. <https://www.gartner.com/en/informationtechnology/glossary/scalability>.
- [19] A. Guley and A. V. Koldovskiy. Digital Currencies of Central Banks (CBDC): Advantages and Disadvantages. 2023.
- [20] M. Klein, J. Gross, and P. Sandner. The digital euro and the role of DLT for central bank digital currencies. *Frankfurt School Blockchain Center Working Paper*, 2020.
- [21] S. Lee and J. Park. *Environmental Implications of a Central Bank Digital Currency (CBDC)*. World Bank, 2022.
- [22] Monetary Authority of Singapore and Temasek. Project Ubin Phase 5: Enabling Broad Ecosystem Opportunities. July 2020.
- [23] S. Nakamoto and A. Bitcoin. A peer-to-peer electronic cash system. *Bitcoin.-URL: https://bitcoin.org/bitcoin.pdf*, 4(2):15, 2008.
- [24] G.-T. Nguyen and K. Kim. A survey about consensus algorithms used in blockchain. *Journal of Information processing systems*, 14(1), 2018.
- [25] L. P. Nóbrega and C. K. da Silva Rodrigues. A eficiência do sistema de pagamentos brasileiro diante da implantação do real digital desafios e oportunidades. *Revista LIFT papers*, 6(6), 2023.
- [26] S. Ozturkcan, K. Senel, and M. Ozdinc. Framing the central bank digital currency (cbdc) revolution. *Technology Analysis & Strategic Management*, pages 1-18, 2022.
- [27] Payments Canada, Bank of Canada, TMX Group, Accenture, and R3. Jasper Phase III: Securities Settlement Using Distributed Ledger Technology, 2018.
- [28] N. Pocher and M. Zichichi. Towards CBDC-based machine-to-machine payments in consumer IoT. In *Proceedings of the 37th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*, pages 308-315, 2022.
- [29] J. Ree. *Nigeria's eNaira, one year after*. International Monetary Fund, 2023.
- [30] R. Ross. Data privacy and security implications of a us central bank digital currency (cbdc). 2024.
- [31] V. Sethaput and S. Innet. Blockchain application for central bank digital currencies (CBDC). *Cluster Computing*, pages 1-15, 2023.
- [32] Y. Ucbas, A. Eleyan, M. Hammoudeh, and M. Alohaly. Performance and scalability analysis of ethereum and hyperledger fabric. *IEEE Access*, 2023.