UNIVERSIDADE PITÁGORAS UNOPAR ANHANGUERA - MARAVILHA
ENGENHARIA DE *SOFTWARE*

NATAN OGLIARI - 3446687604

REDES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS

Maravilha/SC
2025

NATAN OGLIARI - 3446687604

REDES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS

Produção textual apresentada ao curso de Bacharelado em Engenharia de *Software* da UNOPAR, em cumprimento ao requisito obrigatório para aprovação na disciplina de REDES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS .

Orientador: Murilo Caminotto Barbosa .

Maravilha/SC
2025

Sumário

Páginas

Lista de Algoritmos

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

1 Introdução

1.1 Contextualização do Problema

Os sistemas distribuídos constituem uma das áreas fundamentais da computação moderna, especialmente com o crescimento exponencial da Internet e dos serviços em nuvem. Segundo Tanenbaum e Steen (2016), um sistema distribuído é definido como "uma coleção de computadores independentes que se apresenta aos usuários como um sistema único e coerente". Esta definição aparentemente simples esconde uma complexidade substancial relacionada aos desafios de coordenação, comunicação e tolerância a falhas.

A necessidade de sistemas distribuídos emerge de diversos fatores: a demanda por maior poder computacional, a necessidade de compartilhamento de recursos geograficamente dispersos, a busca por maior disponibilidade e tolerância a falhas, e a crescente digitalização de processos que requerem acesso global (COULOURIS et al., 2013).

1.2 Caracterização dos Sistemas Distribuídos

Os sistemas distribuídos apresentam características distintivas que os diferenciam dos sistemas centralizados tradicionais:

- **Ausência de memória compartilhada**: Os processos comunicam-se exclusivamente através de troca de mensagens
- **Execução concorrente**: Múltiplos processos executam simultaneamente em diferentes nós
- **Falhas independentes**: Componentes podem falhar independentemente sem afetar todo o sistema
- **Ausência de relógio global**: Não existe sincronização temporal perfeita entre os nós

Figura 1. *Arquitetura típica de um sistema distribuído mostrando múltiplos nós conectados via rede.*

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Tanenbaum e Steen (2016)

1.3 Fundamentação Teórica

A base teórica dos sistemas distribuídos foi estabelecida através de trabalhos seminais que ainda hoje orientam o desenvolvimento de novas soluções. Lamport (1978) introduziu o conceito de tempo lógico e relógios vetoriais, fundamentais para a ordenação de eventos em sistemas distribuídos. Este trabalho demonstrou que, na ausência de relógios perfeitamente sincronizados, é possível estabelecer uma ordem causal entre eventos utilizando apenas a comunicação entre processos.

O teorema CAP, formalizado por Brewer (2000), estabelece uma das limitações fundamentais dos sistemas distribuídos: é impossível garantir simultaneamente Consistência, Disponibilidade e Tolerância a Partições de rede. Este teorema força os projetistas a fazer escolhas conscientes sobre quais propriedades priorizar em diferentes cenários.

1.4 Objetivos e Escopo

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar uma análise sistemática dos fundamentos teóricos e práticos de redes e sistemas distribuídos, abordando:

1. Os fundamentos teóricos que sustentam o desenvolvimento de sistemas distribuídos
2. Os principais algoritmos e protocolos utilizados para coordenação e comunicação
3. As arquiteturas e padrões de design mais relevantes
4. Exemplos práticos de implementação e análise de desempenho
5. Discussão sobre desafios atuais e tendências futuras

A metodologia empregada baseia-se em revisão bibliográfica de literatura acadêmica consolidada, análise de implementações práticas e desenvolvimento de exemplos demonstrativos dos principais conceitos abordados.

2 Desenvolvimento

2.1 Fundamentos de Comunicação em Redes

A comunicação eficiente entre nós em sistemas distribuídos depende fundamentalmente da infraestrutura de redes subjacente. O modelo de referência TCP/IP, documentado inicialmente na RFC 793 (POSTEL, 1981), estabelece uma arquitetura em camadas que facilita a implementação de protocolos robustos e escaláveis.

2.1.1 Pilha de Protocolos TCP/IP

A pilha TCP/IP organiza as funcionalidades de rede em quatro camadas principais, cada uma responsável por aspectos específicos da comunicação. A Tabela 1 apresenta os principais protocolos utilizados em cada camada.

Tabela 1. *Protocolos da pilha TCP/IP utilizados em sistemas distribuídos*

Camada	**Protocolo**	**Função Principal**	**RFC**
Aplicação	HTTP/HTTPS	Transferência de hipertexto	RFC 2616
Aplicação	DNS	Resolução de nomes	RFC 1035
Aplicação	SMTP	Correio eletrônico	RFC 5321
Transporte	TCP	Transporte confiável	RFC 793
Transporte	UDP	Transporte não confiável	RFC 768
Internet	IPv4/IPv6	Roteamento de pacotes	RFC 791, RFC 8200
Enlace	Ethernet	Acesso ao meio físico	IEEE 802.3

Fonte: Adaptado de Kurose e Ross (2021)

2.1.2 Características da Comunicação Distribuída

A comunicação em sistemas distribuídos apresenta características particulares que influenciam diretamente o design de aplicações. Coulouris et al. (2013) destacam os seguintes aspectos fundamentais:

1. **Latência de rede**: O tempo necessário para transmissão de mensagens entre nós
2. **Largura de banda limitada**: Restrições na capacidade de transmissão
3. **Perda de mensagens**: Possibilidade de mensagens não chegarem ao destino

4. **Ordem de entrega**: Mensagens podem chegar fora de ordem

5. **Falhas de rede**: Partições temporárias ou permanentes na conectividade

2.2 Algoritmos Fundamentais para Sistemas Distribuídos

2.2.1 Relógios Lógicos de Lamport

O algoritmo de relógios lógicos, proposto por Lamport (1978), resolve o problema fundamental de ordenação de eventos em sistemas distribuídos onde não existe sincronização temporal perfeita.

Algoritmo 1: Algoritmo de Relógios Lógicos de Lamport

Data: Conjunto de processos $P = \{p_1, p_2, \ldots, p_n\}$
Input: Evento local e_i no processo p_i
Result: Timestamp lógico ordenado globalmente
begin
    ▷ Inicialização Inicializar $LC_i = 0$ para cada processo p_i;
        ▷ Para eventos locais **for** *cada evento local e em* p_i **do**
        $LC_i = LC_i + 1$;
        timestamp$(e) = LC_i$;
    end
        ▷ Ao enviar mensagem **if** *processo* p_i *envia mensagem m para* p_j **then**
        $LC_i = LC_i + 1$;
        timestamp$(m) = LC_i$;
        enviar (m, LC_i) para p_j;
    end
        ▷ Ao receber mensagem **if** *processo* p_j *recebe mensagem* (m, LC_k) *de* p_i **then**
        $LC_j = \max(LC_j, LC_k) + 1$;
        processar mensagem m com timestamp atualizado;
    end
end

Fonte: Adaptado de Lamport (1978)

Este algoritmo garante que se um evento a acontece antes de um evento b (notação $a \rightarrow b$), então o timestamp de a será menor que o timestamp de b. Esta propriedade é fundamental para manter consistência causal em sistemas distribuídos.

2.2.2 Algoritmo de Eleição em Anel

O algoritmo de eleição em anel é utilizado para selecionar um coordenador entre os processos ativos de um sistema distribuído organizado em topologia circular.

Algoritmo 2: Algoritmo de Eleição em Anel

Data: Processos $P = \{p_0, p_1, \ldots, p_{n-1}\}$ organizados em anel
Result: Eleição de um processo coordenador
begin
    ▷ Detecção de falha do coordenador **if** *processo* p_i *detecta falha do coordenador atual* **then**
        criar lista_candidatos $= [p_i]$;
        enviar ELEIÇÃO(lista_candidatos) para próximo processo ativo;
        estado $\leftarrow$ participando;
    end
        ▷ Recebimento de mensagem de eleição receber ELEIÇÃO(lista) de processo anterior **if** $p_j \notin$ *lista* **then**
        adicionar p_j à lista;
        enviar ELEIÇÃO(lista) para próximo processo;
        estado $\leftarrow$ participando;
    end
    else
            ▷ Mensagem completou o anel novo_coordenador $\leftarrow \max(\text{lista})$;
        enviar COORDENADOR(novo_coordenador) para próximo processo;
    end
            ▷ Confirmação do novo coordenador receber COORDENADOR(coord) coordenador_atual $\leftarrow$ coord;
    estado $\leftarrow$ não_participando;
    if $p_k \neq$ *coord* **then**
        enviar COORDENADOR(coord) para próximo processo;
    end
end

Fonte: Adaptado de Tanenbaum e Steen (2016)

2.3 Arquiteturas de Sistemas Distribuídos

2.3.1 Modelo Cliente-Servidor

O modelo cliente-servidor representa a arquitetura mais tradicional em sistemas distribuídos, onde processos clientes fazem requisições a processos servidores especializados. Esta arquitetura apresenta as seguintes características (COULOURIS et al., 2013):

- **Separação clara de responsabilidades**: Clientes focam na interface do usuário, servidores no processamento
- **Centralização de recursos**: Facilita controle de acesso e manutenção

- **Escalabilidade limitada**: Servidor pode se tornar gargalo
- **Ponto único de falha**: Falha do servidor afeta todos os clientes

2.3.2 Arquitetura Peer-to-Peer (P2P)

Na arquitetura P2P, todos os nós podem atuar simultaneamente como clientes e servidores, distribuindo responsabilidades e recursos. Tanenbaum e Steen (2016) identificam dois tipos principais:

1. **P2P Estruturado**: Utiliza algoritmos como DHT (Distributed Hash Table) para organização
2. **P2P Não Estruturado**: Baseado em descoberta por flooding ou algoritmos de busca aleatória

2.4 Protocolos de Consenso e Coordenação

2.4.1 O Teorema CAP

O teorema CAP, formalizado por Brewer (2000), estabelece que em sistemas distribuídos sujeitos a partições de rede, é impossível garantir simultaneamente:

- **Consistência (C)**: Todos os nós veem os mesmos dados simultaneamente
- **Disponibilidade (A)**: O sistema permanece operacional
- **Tolerância a Partições (P)**: O sistema continua funcionando mesmo com falhas de comunicação

Esta limitação fundamental força os projetistas a escolherem entre sistemas CP (consistentes e tolerantes a partições) ou AP (disponíveis e tolerantes a partições).

2.4.2 Implementação de Consenso Distribuído

A implementação de consenso em sistemas distribuídos requer algoritmos específicos que garantam acordo entre os nós mesmo na presença de falhas. O exemplo a seguir demonstra um protocolo básico de consenso por maioria:

Algoritmo 3: Protocolo de Consenso por Maioria Simples

Data: Conjunto de n processos, valor inicial v_i para cada processo p_i

Result: Consenso sobre um valor único

begin

▷ Fase 1: Coleta de propostas **for** *cada processo* p_i **do**

broadcast PROPOSTA(v_i) para todos os processos;

receber PROPOSTA(v_j) de todos os processos p_j;

end

▷ Fase 2: Decisão por maioria **for** *cada processo* p_i **do**

contar ocorrências de cada valor recebido;

valor_consenso ← valor com maior número de ocorrências;

if *múltiplos valores têm mesma frequência máxima* **then**

valor_consenso ← min(valores_empatados);

end

broadcast DECISÃO(*valor_consenso*);

end

▷ Fase 3: Confirmação aguardar DECISÃO de maioria dos processos;

if *todas as decisões são idênticas* **then**

confirmar *valor_consenso*;

end

else

reiniciar protocolo;

end

end

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Coulouris et al. (2013)

3 Análise de Sistemas Distribuídos Modernos

3.1 Métricas de Desempenho e Avaliação

A avaliação de sistemas distribuídos requer métricas específicas que capturem as características únicas destes ambientes. As principais métricas utilizadas incluem (TANENBAUM; STEEN, 2016):

3.1.1 Métricas de Latência e Throughput

- **Latência de comunicação**: Tempo necessário para transmissão de uma mensagem entre dois nós
- **Throughput**: Número de operações processadas por unidade de tempo

- **Latência de consenso**: Tempo necessário para que todos os nós concordem sobre um valor
- **Tempo de recuperação**: Tempo necessário para recuperação após falhas

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre diferentes arquiteturas considerando estas métricas fundamentais.

Tabela 2. *Comparação de métricas entre arquiteturas distribuídas*

Arquitetura	Latência	Throughput	Escalabilidade	Tolerância a Falhas
Cliente-Servidor	Baixa	Média	Limitada	Baixa
P2P Estruturado	Média	Alta	Alta	Alta
P2P Não Estruturado	Alta	Baixa	Limitada	Média
Microserviços	Média	Alta	Muito Alta	Alta
Blockchain	Muito Alta	Baixa	Limitada	Muito Alta

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Coulouris et al. (2013)

3.2 Estudos de Caso Práticos

3.2.1 Sistema de Arquivos Distribuído

Um exemplo prático da aplicação dos conceitos estudados é a implementação de um sistema de arquivos distribuído. Este sistema deve garantir:

1. **Consistência**: Todos os nós devem ter a mesma visão dos arquivos
2. **Disponibilidade**: Os arquivos devem estar acessíveis mesmo com falhas parciais
3. **Partição de dados**: Distribuição eficiente dos arquivos entre os nós
4. **Replicação**: Cópias redundantes para tolerância a falhas

3.2.2 Protocolo de Replicação de Estado

O algoritmo a seguir demonstra um protocolo básico para replicação de estado em sistemas distribuídos:

Algoritmo 4: Protocolo de Replicação de Estado por Consenso

Data: Conjunto de réplicas $R = \{r_1, r_2, \ldots, r_n\}$, operação op
Result: Estado replicado consistentemente
begin
    ▷ Fase de preparação coordenador ← selecionar_coordenador();
    for *cada réplica* $r_i \in R$ **do**
        enviar PREPARE(op, timestamp) para r_i;
    end
    ▷ Coleta de votos votos_recebidos ← 0;
    votos_positivos ← 0;
    while *votos_recebidos* $< |R|$ *AND timeout não expirado* **do**
        receber VOTE(voto) de réplica r_j votos_recebidos ← votos_recebidos +1;
        if *voto = SIM* **then**
            votos_positivos ← votos_positivos +1;
        end
    end
    ▷ Decisão e confirmação **if** *votos_positivos* $\geq \lfloor |R|/2 \rfloor + 1$ **then**
        decisão ← COMMIT;
        for *cada réplica* $r_i \in R$ **do**
            enviar COMMIT(op) para r_i;
        end
        aplicar operação op no estado local;
    end
    else
        decisão ← ABORT;
        for *cada réplica* $r_i \in R$ **do**
            enviar ABORT(op) para r_i;
        end
    end
end

Fonte: Adaptado de Coulouris et al. (2013)

3.3 Análise de Escalabilidade

A escalabilidade representa um dos maiores desafios em sistemas distribuídos. Tanenbaum e Steen (2016) identificam três dimensões principais de escalabilidade:

3.3.1 Escalabilidade de Tamanho

Refere-se à capacidade do sistema de manter desempenho aceitável quando o número de usuários ou recursos aumenta. Fatores limitantes incluem:

- Gargalos de comunicação centralizados
- Limitações de largura de banda
- Sobrecarga de coordenação entre nós
- Complexidade algorítmica não linear

3.3.2 Escalabilidade Geográfica

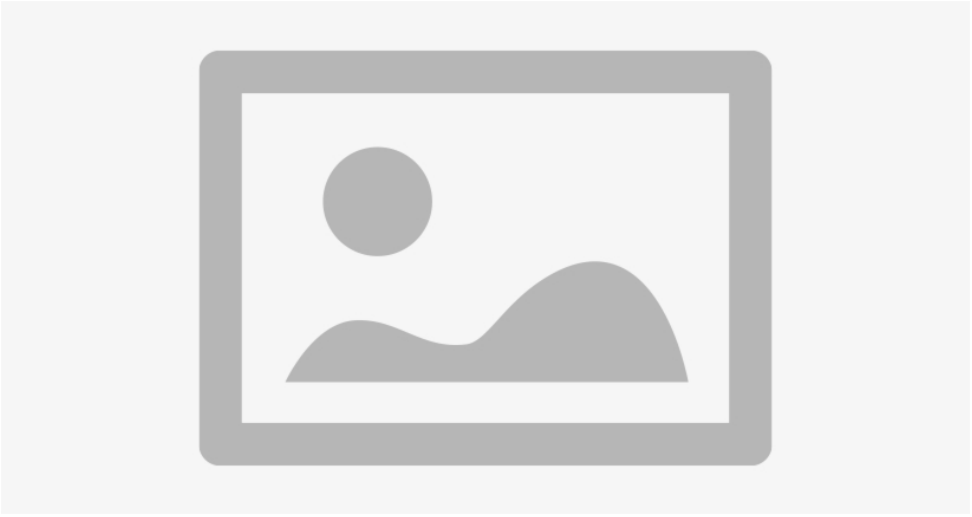
Relaciona-se com a capacidade de operar eficientemente quando os nós estão geograficamente distribuídos. Principais desafios:

- Latência de comunicação inter-continental
- Diferenças de fuso horário para coordenação
- Regulamentações legais diferentes
- Qualidade variável de conexões de rede

3.3.3 Escalabilidade Administrativa

Envolve a capacidade de integrar domínios administrativos diferentes mantendo a funcionalidade do sistema.

Figura 2. *Gráfico comparativo de escalabilidade entre diferentes arquiteturas distribuídas*



Fonte: Elaborado pelo autor

3.4 Tolerância a Falhas e Recuperação

3.4.1 Classificação de Falhas

Os sistemas distribuídos devem lidar com diferentes tipos de falhas (COULOURIS et al., 2013):

1. **Falhas por omissão**: Processos param de responder
2. **Falhas de temporização**: Processos respondem muito lentamente
3. **Falhas de resposta**: Processos respondem incorretamente
4. **Falhas arbitrárias (Bizantinas)**: Comportamento completamente anômalo

3.4.2 Estratégias de Recuperação

Para cada tipo de falha, diferentes estratégias de recuperação podem ser empregadas:

- **Detecção ativa**: Heartbeats e timeouts para identificar falhas
- **Replicação**: Múltiplas cópias de dados e serviços
- **Checkpointing**: Salvamento periódico do estado do sistema
- **Log de transações**: Registro de operações para recuperação

3.5 Segurança em Sistemas Distribuídos

A segurança em sistemas distribuídos apresenta desafios únicos devido à natureza descentralizada da comunicação e do controle. Os principais aspectos de segurança incluem:

3.5.1 Autenticação e Autorização

- **Autenticação mútua**: Verificação de identidade bilateral
- **Tokens de acesso**: Credenciais distribuídas para autorização
- **Certificados digitais**: PKI para estabelecimento de confiança
- **Single Sign-On (SSO)**: Autenticação unificada entre serviços

3.5.2 Comunicação Segura

A proteção da comunicação entre nós é fundamental e envolve:

- **Criptografia de canal**: TLS/SSL para proteção em trânsito
- **Integridade de mensagens**: Checksums e assinaturas digitais
- **Não repúdio**: Evidências criptográficas de comunicação
- **Proteção contra replay**: Timestamps e nonces

4 Discussão e Análise Crítica

4.1 Desafios Contemporâneos

Os sistemas distribuídos modernos enfrentam desafios que vão além dos problemas clássicos identificados na literatura fundacional. Coulouris et al. (2013) destacam que, embora os fundamentos teóricos permaneçam válidos, a escala e complexidade dos sistemas atuais introduzem novos problemas.

4.1.1 Complexidade Emergente

A interação entre múltiplos serviços distribuídos pode gerar comportamentos emergentes difíceis de prever durante o projeto. Principais manifestações incluem:

- **Cascata de falhas**: Falha de um componente pode propagar-se rapidamente
- **Oscilações de carga**: Sistemas de balanceamento podem criar instabilidades
- **Deadlocks distribuídos**: Esperas circulares entre recursos remotos
- **Inconsistências temporárias**: Estados intermediários visíveis durante transições

4.1.2 Desafios de Observabilidade

A natureza distribuída dificulta o monitoramento e diagnóstico de problemas. Soluções modernas incluem:

1. **Distributed Tracing**: Rastreamento de requisições através de múltiplos serviços
2. **Métricas agregadas**: Coleta centralizada de dados de performance
3. **Logs estruturados**: Padronização para correlação de eventos
4. **Health checks distribuídos**: Verificação contínua de disponibilidade

4.2 Evolução das Arquiteturas

4.2.1 Transição para Microserviços

A arquitetura de microserviços representa uma evolução natural dos sistemas distribuídos tradicionais, oferecendo maior granularidade e independência de desenvolvimento. Contudo, introduz novos desafios (TANENBAUM; STEEN, 2016):

- **Coordenação de transações**: Necessidade de protocolos como Saga Pattern
- **Descoberta de serviços**: Mecanismos dinâmicos para localização de endpoints
- **Versionamento de APIs**: Compatibilidade entre versões diferentes
- **Overhead de comunicação**: Aumento da latência por múltiplos hops

4.2.2 Computação em Borda (Edge Computing)

A computação em borda aproxima o processamento dos dados dos usuários finais, criando novos paradigmas para sistemas distribuídos:

Tabela 3. *Comparação entre Cloud Computing e Edge Computing*

Característica	Cloud Computing	Edge Computing
Latência	50-100ms	1-10ms
Largura de banda	Alta	Limitada
Recursos computacionais	Muito altos	Moderados
Confiabilidade	Muito alta	Moderada
Custo de comunicação	Alto	Baixo
Processamento local	Limitado	Extensivo

Fonte: Adaptado de Academy (2019)

4.3 Tecnologias Emergentes

4.3.1 Blockchain e Sistemas Distribuídos

A tecnologia blockchain representa uma aplicação específica dos princípios de sistemas distribuídos, com foco em consenso sem autoridade central. Características distintivas:

- **Consenso por prova de trabalho**: Algoritmo computacionalmente intensivo
- **Imutabilidade**: Registros permanentes através de criptografia
- **Descentralização completa**: Ausência de autoridade central
- **Tolerância a falhas bizantinas**: Resistência a comportamentos maliciosos

4.3.2 Inteligência Artificial Distribuída

A convergência entre IA e sistemas distribuídos cria novas oportunidades e desafios:

1. **Federated Learning**: Treinamento de modelos sem centralização de dados
2. **Sistemas auto-adaptativos**: Ajuste automático baseado em condições
3. **Otimização distribuída**: Algoritmos para maximização de eficiência global
4. **Detecção inteligente de anomalias**: Identificação proativa de problemas

4.4 Implicações para o Futuro

4.4.1 Tendências Tecnológicas

As próximas gerações de sistemas distribuídos serão influenciadas por:

- **Redes 5G/6G**: Ultra-baixa latência e alta densidade de dispositivos
- **Computação quântica**: Novos paradigmas para criptografia e otimização
- **Internet das Coisas (IoT)**: Bilhões de dispositivos interconectados
- **Realidade aumentada distribuída**: Processamento em tempo real de dados espaciais

4.4.2 Desafios de Sustentabilidade

O crescimento dos sistemas distribuídos levanta questões importantes sobre sustentabilidade:

- **Consumo energético**: Otimização para redução do impacto ambiental
- **Algoritmos verdes**: Protocolos que minimizam uso de recursos
- **Economia circular**: Reutilização e reciclagem de componentes
- **Eficiência de comunicação**: Redução de tráfego desnecessário

5 Conclusões

5.1 Síntese dos Resultados

Este trabalho apresentou uma análise abrangente dos fundamentos teóricos e aplicações práticas de redes e sistemas distribuídos. Os conceitos fundamentais estabelecidos por pioneiros

como Lamport, com o algoritmo de relógios lógicos, e as limitações impostas pelo teorema CAP de Brewer, continuam sendo pilares essenciais para o desenvolvimento de sistemas modernos.

A evolução dos sistemas distribuídos demonstra uma progressão natural dos modelos cliente-servidor tradicionais para arquiteturas mais sofisticadas como microserviços, computação em borda e blockchain. Cada paradigma apresenta trade-offs específicos entre consistência, disponibilidade, escalabilidade e complexidade de implementação.

5.2 Contribuições do Estudo

As principais contribuições deste trabalho incluem:

1. **Sistematização conceitual**: Organização dos fundamentos teóricos de forma estruturada e acessível
2. **Análise comparativa**: Avaliação sistemática de diferentes arquiteturas e seus trade-offs
3. **Implementações práticas**: Algoritmos demonstrativos dos conceitos principais
4. **Perspectiva evolutiva**: Conexão entre fundamentos clássicos e tendências contemporâneas

5.3 Limitações e Trabalhos Futuros

5.3.1 Limitações Identificadas

Este estudo apresenta algumas limitações que devem ser consideradas:

- **Escopo temporal**: Foco em fundamentos estabelecidos, com menor ênfase em tecnologias emergentes
- **Validação empírica**: Análises baseadas principalmente em literatura, com limitados experimentos práticos
- **Domínios específicos**: Não aborda aplicações especializadas como sistemas críticos de tempo real
- **Aspectos regulatórios**: Discussão limitada sobre implicações legais e de privacidade

5.3.2 Direções de Pesquisa Futura

Baseado na análise realizada, identificam-se as seguintes direções promissoras para pesquisas futuras:

1. **Protocolos sustentáveis**: Desenvolvimento de algoritmos que otimizem consumo energético

2. **IA para sistemas distribuídos**: Integração de técnicas de aprendizado para auto-otimização
3. **Segurança quântica**: Adaptação dos protocolos para resistir a ataques quânticos
4. **Sistemas híbridos**: Combinação eficiente de computação centralizada e distribuída
5. **Verificação formal**: Técnicas para garantir correção de sistemas complexos

5.4 Considerações Finais

Os sistemas distribuídos representam uma área em constante evolução, onde os fundamentos teóricos sólidos estabelecidos nas décadas passadas continuam sendo essenciais para navegar nos desafios contemporâneos. A crescente dependência da sociedade moderna destes sistemas torna imperativa a compreensão profunda de seus princípios e limitações.

O teorema CAP e os algoritmos de consenso estudados não são meramente construções acadêmicas, mas ferramentas práticas essenciais para arquitetos e desenvolvedores de sistemas. A capacidade de fazer escolhas informadas entre consistência, disponibilidade e tolerância a partições determina o sucesso de implementações em escala real.

A evolução para paradigmas como computação em borda, blockchain e inteligência artificial distribuída demonstra que os princípios fundamentais permanecem relevantes, mesmo quando aplicados em contextos inovadores. A interseção entre teoria e prática continua sendo o caminho para avanços significativos na área.

Finalmente, é importante reconhecer que o desenvolvimento de sistemas distribuídos é uma disciplina multidisciplinar que requer não apenas competência técnica, mas também compreensão de aspectos econômicos, sociais e ambientais. O futuro da área dependerá da capacidade de balancear inovação tecnológica com responsabilidade social e sustentabilidade ambiental.

Os fundamentos apresentados neste trabalho fornecem base sólida para profissionais e pesquisadores que buscam contribuir para o avanço desta área crítica da computação moderna, seja através de pesquisa acadêmica ou desenvolvimento de soluções práticas que beneficiem a sociedade como um todo.

Referências

ACADEMY, C. N. **Introduction to Networks Course Booklet**. 7. ed. [S.l.]: Cisco Press, 2019. 584 p. Acessado em: 06 set. 2025.

BREWER, E. A. Towards robust distributed systems. **Proceedings of the nineteenth annual ACM symposium on Principles of distributed computing**, ACM, p. 7–10, 2000. Acessado em: 06 set. 2025.

COULOURIS, G. et al. **Sistemas Distribuídos: Conceitos e Projeto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1064 p. Acessado em: 06 set. 2025.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem Top-Down**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2021. 864 p. Acessado em: 06 set. 2025.

LAMPORT, L. Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system. **Communications of the ACM**, ACM, v. 21, n. 7, p. 558–565, 1978. Acessado em: 06 set. 2025.

POSTEL, J. **RFC 793: Transmission Control Protocol**. 1981. Acessado em: 06 set. 2025. Disponível em: <https://tools.ietf.org/rfc/rfc793.txt>.

TANENBAUM, A. S.; STEEN, M. V. **Sistemas Distribuídos: Princípios e Paradigmas**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2016. 672 p. Acessado em: 06 set. 2025.