

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BRENO FARIAS DA SILVA

**TEOREMA CAP EM SISTEMAS DISTRIBUÍDOS: UMA REVISÃO
SISTEMÁTICA DOS PRINCÍPIOS**

CAMPO MOURÃO

2023

BRENO FARIAS DA SILVA

**TEOREMA CAP EM SISTEMAS DISTRIBUÍDOS: UMA REVISÃO
SISTEMÁTICA DOS PRINCÍPIOS**

CAP Theorem in Distributed Systems: A Systematic Review of the Principles

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Ciência da Computação
do Curso de Bacharelado em Ciência da
Computação da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná.

Orientador: Nome Orientador completo e título

Coorientador: Nome Orientador completo e
título

CAMPO MOURÃO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

RESUMO

Os sistemas distribuídos desempenham um papel importante na computação moderna, pois permitem a criação de softwares escaláveis, flexíveis e de alto desempenho. Contudo, esses sistemas enfrentam instigações inerentes, como a necessidade de prover consistência, disponibilidade e tolerância a falhas de partição em um ambiente distribuído. Com isso em mente, o teorema CAP é uma importante teoria, inicialmente proposta por Eric Brewer, que lida com os trade-offs intrínsecos no design do projeto de um sistema distribuído. O teorema CAP não é um conceito trivial então, como toda ciência, para ela evoluir, é necessário que o conhecimento desse assunto seja muito bem difundido. Sendo assim, urge a necessidade de compreender profundamente os compromissos atrelados ao teorema CAP, de modo a projetar sistemas distribuídos eficazes e adequados às necessidades específicas de cada aplicação, além de estar ciente das suas limitações. Este artigo tem como objetivo incluir novos pesquisadores na área de modo a incitar o estudo de novos métodos e soluções. Para tanto, o teorema CAP precisa ser apresentado para os iniciantes na área da computação, comparando diferentes resultados e suas implicações em sistemas distribuídos. Dessa forma, é essencial a leitura das principais obras existentes sobre o tema, de modo a promover uma base sólida de conhecimento e estimular futuras pesquisas e inovações nesse campo em constante evolução. A pesquisa será conduzida por meio de uma revisão sistemática da literatura, com base em artigos científicos relevantes sobre sistemas distribuídos e o teorema CAP. Serão considerados estudos de caso e experiências práticas de implementação de sistemas distribuídos para enriquecer a compreensão dos desafios e soluções associadas ao teorema CAP. Espera-se que este estudo proporcione um melhor entendimento sobre o teorema CAP e suas implicações na concepção de sistemas distribuídos. Os resultados deverão apresentar uma visão clara dos compromissos envolvidos e das possíveis estratégias para alcançar consistência, disponibilidade e tolerância a partições. Com base na análise e comparação das abordagens estudadas, espera-se que o artigo conclua que o leitor tenha compreendido por completo o teorema CAP e suas implicações, de modo a estar apto, no processo de desenvolvimento de um sistema distribuído, priorizar critérios de acordo com as necessidades e características específicas de cada aplicação, estando ciente das suas limitações.

Palavras-chave: teorema cap; sistemas distribuidos; consistência; disponibilidade; tolerância a partições.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

CAP	Consistência, Disponibilidade e Tolência a partição
-----	---

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
2	REVISÃO DA BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Fundamentação teórica	7
2.2	Trabalhos Relacionados	7
3	DESENVOLVIMENTO	10
3.1	Proposta	10
3.2	Metologia	10
3.3	Resultados e Contribuições Esperadas	11
3.4	Cronograma de Execução	11
	REFERÊNCIAS	13

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas distribuídos desempenham um papel fundamental em nossa sociedade cada vez mais conectada, permitindo a troca de informações e o compartilhamento de recursos entre diferentes dispositivos e usuários. No entanto, a natureza distribuída desses sistemas apresentam desafios significativos, como manter a consistência dos dados em ambientes onde ocorrem falhas e partições de rede. Nesse contexto, o Teorema da Consistência, Disponibilidade e Tolância a partição (CAP) tem sido amplamente discutido e estudado como um importante princípio para projetar e entender sistemas distribuídos, visto que veio de encontro com os conceitos de ACID(Consistência) e BASE(Disponibilidade) (OVERFLOW, 2013).

Ao longo dos anos, diversos estudos têm explorado os desafios e soluções relacionados ao CAP em sistemas distribuídos como, por exemplo, no estudo *CAP Twelve Years Later: How the “Rules” Have Changed* (BREWER, 2012) do próprio criador do teorema mencionado, o qual é analisado alguns acontecimentos relacionado a má interpretação das “regras” do CAP. Pesquisadores têm analisado diferentes aspectos, como as propriedades dos sistemas que podem ser garantidas simultaneamente, a complexidade dos algoritmos de consistência, os trade-offs entre consistência e disponibilidade, e as estratégias para lidar com partições de rede. Várias abordagens têm sido propostas, como os modelos de consistência eventual (VOGELS, 2009), forte e fraca, além de técnicas de replicação de dados e algoritmos de consenso distribuído, como o algoritmo Paxos (LAMPORT, 2001).

Apesar dos avanços significativos alcançados na área, há uma lacuna no estado-da-arte em relação à difusão e compreensão do CAP entre os novos pesquisadores. A complexidade inerente ao teorema e a falta de materiais didáticos e recursos de aprendizagem adequados podem dificultar a entrada de novos estudiosos nesse campo. Portanto, é necessário direcionar esforços para preencher essa lacuna e incentivar a pesquisa nessa área vital dos sistemas distribuídos.

O objetivo deste trabalho é explicar a importância do CAP em sistemas distribuídos e fornecer uma revisão sistemática dos princípios relacionados a esse teorema. Busca-se enriquecer a compreensão dos desafios e soluções associados ao CAP, a fim de incentivar e capacitar novos pesquisadores a contribuírem nessa área de pesquisa. Ao final deste trabalho, espera-se que os leitores tenham adquirido conhecimento aprofundado sobre o CAP, seus conceitos fundamentais e as abordagens existentes para lidar com as suas implicações. Como objetivos específicos, ou sejam, subprodutos que contribuem para atingir o objetivo geral do artigo, temos:

- Analisar e compreender os conceitos fundamentais do CAP em sistemas distribuídos, incluindo as propriedades de consistência, disponibilidade e tolerância a partições de rede.

- Realizar uma revisão sistemática da literatura sobre o CAP, identificando as principais abordagens, modelos de consistência e algoritmos de replicação de dados utilizados na área.
- Investigar os desafios e trade-offs associados à aplicação do CAP em diferentes cenários de sistemas distribuídos, considerando aspectos como escalabilidade, desempenho e resiliência a falhas.
- Demonstrar, por meio de exemplos e estudos de caso, a importância e os benefícios de projetar sistemas distribuídos levando em consideração os princípios do CAP. Contribuir para a ampliação do conhecimento na área de sistemas distribuídos, oferecendo uma visão atualizada dos avanços recentes e das tendências futuras relacionadas ao CAP.

A metodologia adotada neste trabalho consiste em uma revisão bibliográfica da literatura sobre o CAP e seus princípios. Serão pesquisados principalmente por artigos científicos, porém livros, conferências e recursos online também serão considerados como opções, selecionando-se aqueles que abordam diretamente o CAP e suas aplicações ou conceito incompreendidos em sistemas distribuídos. Visto que o foco está no uso de artigo, tem-se que serão pesquisados por eles nos principais repositórios disponíveis, no caso, o da ACM Digital Library, IEEE Xplore, Google Scholar e SpringerLink, onde espera-se ter pelo menos 30 artigos viáveis, todavia certas análises prévias quanto aos seus métodos e resultados será feita, de modo a afunilar para obter-se os 10 melhores candidatos. A partir da análise desses materiais, serão extraídos os principais resultados publicados na área, proporcionando uma visão abrangente e atualizada do estado-da-arte.

Espera-se que este trabalho proporcionará uma visão abrangente dos principais resultados publicados no campo do CAP em sistemas distribuídos. Serão apresentados os diferentes modelos de consistência, as técnicas de replicação de dados mais utilizadas e os algoritmos de consenso.

O trabalho identifica e aborda uma lacuna existente na compreensão e difusão do CAP entre novos pesquisadores. Ao fornecer uma introdução clara e acessível ao tema, busca incentivar o envolvimento e a pesquisa nesse campo. Além disso, o artigo realiza uma revisão sistemática da literatura sobre o CAP, fornecendo uma compilação abrangente dos principais resultados e abordagens na área. Isso oferece uma visão consolidada e atualizada do estado-da-arte.

2 REVISÃO DA BIBLIOGRÁFICA

Uma revisão bibliográfica é necessária, pois aqui serão apresentados os conceitos básicos e fundamentais para a visão geral da área de pesquisa e do problema, porém agora com uma fundamentação teórica do assunto. A subseção de trabalhos relacionados listará as propostas relevantes, as quais serão comparadas com o trabalho em questão.

2.1 Fundamentação teórica

O Teorema CAP foi criado por Eric Brewer, o qual é muito bem definido no artigo “Brewer’s CAP Theorem” (SALOMÉ, 2012) explica que “The CAP theorem states: You can have at most two of these properties for any shared-data system”, ou seja, o autor descreveu que em um sistema distribuído, é impossível garantir simultaneamente consistência, disponibilidade e tolerância a partições de rede. Esses três atributos são muito bem definidos com profundidade no artigo “Perspectives on the CAP Theorem” (GILBERT; LYNCH, 2012).

O primeiro termo da sigla CAP, denominado de “consistência”, refere-se à uniformidade dos dados em um sistema distribuído. Um sistema é considerado consistente quando todas as réplicas dos dados em diferentes nós apresentam a mesma versão dos dados em um determinado momento. O segundo termo da sigla trata da “availability”, que em português significa “disponibilidade”, o qual diz respeito à capacidade de um sistema de responder a solicitações, mesmo em face de falhas ou partições de rede. Um sistema é considerado disponível se os usuários podem acessar e obter respostas, mesmo que alguns nós ou conexões falhem. Por fim, a última letra referente ao teorema trata da “partition tolerance”, que é dado como a tolerância a partições de rede, o qual concerne à capacidade de um sistema de continuar operando e garantir consistência e disponibilidade mesmo que ocorram falhas de comunicação entre nós. A compreensão desses conceitos é essencial para compreender os desafios e as soluções relacionados ao Teorema CAP em sistemas distribuídos.

Tais definições estão muito bem explicadas na literatura e são mencionadas em diversos estudos, como nos artigos “Brewer’s CAP Theorem” (SALOMÉ, 2012), ou no blog post “You Can’t Sacrifice Partition Tolerance” (HALE, 2010), sendo que o autor cita os autores Seth Gilbert e Nancy Lynch do artigo “Perspectives on the CAP Theorem”.

2.2 Trabalhos Relacionados

Note: Comparar todos com o meu trabalho!

- “Perspectives on the CAP Theorem”(GILBERT; LYNCH, 2012): Este trabalho oferece uma análise abrangente das diferentes perspectivas e interpretações do Teorema CAP. Ele explora as implicações teóricas e práticas do Teorema e discute as compensações

necessárias para contextos onde prioriza-se consistência ou disponibilidade em sistemas distribuídos, além disso inclui um capítulo relevante onde ele demonstra como atingir tanto consistência quanto disponibilidade, por meio da segmentação de dados, usuário, operações, entre outros. Além disso, os autores deste artigo são os responsáveis pela prova formal do CAP no artigo “Brewer’s Conjecture and the Feasibility of Consistent Available Partition-Tolerant Web Services” (GILBERT; LYNCH, 2002).

- “You Can’t Sacrifice Partition Tolerance”(HALE, 2010): Este blog post enfatiza a importância da tolerância a partições de rede no contexto do Teorema CAP. Ele argumenta que a tolerância a partições é um requisito fundamental para sistemas distribuídos resilientes e explora as implicações dessa escolha como, por exemplo, em sistemas reais, é impossível atender a trilhões de requisições simultâneas tendo um arquitetura centralizada, ou seja, que não seja particionada na rede (argumento também exposto em “Eventually Consistent” (VOGELS, 2009). Além disso, o próprio autor do teorema CAP usou este blog post como motivação para escrever o artigo abaixo, devido ao fato do CAP ter apresentado várias interpretações errôneas.
- “Brewer’s CAP Theorem”(SALOMÉ, 2012): Neste trabalho, o autor apresenta o Teorema CAP, mencionando as três propriedades (consistência, disponibilidade e tolerância a partições) definidas por outros autores e sua relação mútua. O artigo oferece uma visão geral do Teorema e suas implicações práticas, além de mencionar a formulação feita pelo Eric Brewer no artigo “CAP Twelve Years Later - How the ‘Rules’ Have Changed” de que a decisão não é binária. Por fim, o autor também menciona (GILBERT; LYNCH, 2002), junto com exemplos de aplicações reais, como o Amazon Dynamo, do teorema em questão.
- “CAP Twelve Years Later - How the ‘Rules’ Have Changed”(BREWER, 2012): Esse trabalho revisita o Teorema CAP após doze anos de sua formulação inicial. Ele discute como as interpretações errôneas do Teorema evoluíram e como as tecnologias e práticas de sistemas distribuídos se adaptaram ao longo do tempo.

Em comparação com esses trabalhos relacionados, o artigo proposto “Teorema CAP em Sistemas Distribuídos: Uma Revisão Sistemática dos Princípios” busca preencher a lacuna existente na compreensão e difusão do Teorema CAP, oferecendo uma revisão sistemática da literatura sobre o tema. Ele se concentra em fornecer uma visão geral abrangente, identificar lacunas na pesquisa e apresentar recomendações práticas para a aplicação do Teorema CAP em sistemas distribuídos.

Uma lacuna que nenhum dos trabalhos acima preenche, no qual este trabalho pretende resolver, é também englobar a questão do porque a maioria dos sistemas se encontram no campo AP, ou seja, focados em ter disponibilidade e tolerância a partição. Além disso, também considero uma lacuna a ser preenchida, de modo a dar mais completude para o artigo, explica

também porque a decisão não é binária e o motivo de ser inviável fugir da partição de rede. Dessa forma, o leitor tendo um artigo mais completo sobre o tema, o qual define tantos os termos, quantos as limitações e as práticas

Essa revisão da literatura permite contextualizar o trabalho em relação aos conhecimentos existentes, destacando sua contribuição específica para o campo do Teorema CAP em sistemas distribuídos.

3 DESENVOLVIMENTO

Na seção de desenvolvimento deste artigo, exploraremos a proposta deste instrumento de estudo, junto com uma descrição melhor da descrição do método, uma explicação dos resultados esperados e, por fim, o cronograma de execução deste estudo.

3.1 Proposta

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma revisão sistemática da literatura sobre o teorema CAP em sistemas distribuídos, a fim de fornecer uma compreensão aprofundada dos princípios subjacentes, dos trade-offs e das estratégias para lidar com os desafios de consistência e disponibilidade, de modo a introduzir novos pesquisadores na área. Os objetivos específicos são:

- Apresentar uma visão geral do Teorema CAP, incluindo suas definições e implicações para sistemas distribuídos.
- Realizar uma revisão bibliográfica abrangente, buscando artigos científicos, livros, conferências e recursos online relevantes que abordem o teorema CAP e seus aspectos relacionados.
- Analisar e comparar os trabalhos encontrados, identificando as principais abordagens e soluções propostas para lidar com os compromissos do teorema CAP.
- Investigar estudos de caso e experiências práticas de implementação de sistemas distribuídos, a fim de enriquecer a compreensão dos desafios e soluções associados ao teorema CAP.
- Identificar lacunas na literatura e destacar possíveis áreas de pesquisa futura relacionadas ao teorema CAP em sistemas distribuídos.

3.2 Metodologia

A metodologia a ser adotada para o desenvolvimento deste trabalho será baseada em uma revisão sistemática da literatura. As etapas a serem seguidas são:

1. Definição dos critérios de busca: serão estabelecidos critérios de busca claros, incluindo palavras-chave e filtros para selecionar os artigos relevantes para a revisão.
2. Seleção dos artigos: os artigos serão selecionados com base em critérios de inclusão e exclusão pré-definidos, considerando sua relevância para o tema de estudo.

3. Análise dos artigos: os artigos selecionados serão analisados em detalhes, identificando os principais conceitos, abordagens, trade-offs e resultados apresentados.
4. Síntese dos resultados: os resultados serão sintetizados em uma revisão sistemática, organizando os principais pontos discutidos nos artigos e identificando lacunas na literatura.

3.3 Resultados e Contribuições Esperadas

Espera-se que este trabalho proporcione uma visão abrangente dos princípios do teorema CAP em sistemas distribuídos, destacando os trade-offs e desafios associados à consistência e disponibilidade. Além disso, espera-se identificar soluções e abordagens propostas na literatura para lidar com os compromissos do teorema CAP. As principais contribuições deste trabalho são:

- Revisão sistemática da literatura sobre o teorema CAP em sistemas distribuídos.
- Análise comparativa das abordagens e soluções encontradas na literatura.
- Identificação de lacunas na pesquisa atual e sugestão de possíveis áreas de pesquisa futura.
- Disponibilização de um artigo de referência para profissionais e pesquisadores interessados no tema.

3.4 Cronograma de Execução

O cronograma proposto para a execução deste trabalho segue as etapas definidas na metodologia, todavia é necessário acrescentar as seguintes atividades:

5. Redação do artigo final.
6. Revisão e formatação.

Atividade	01/02	03/04	05/06	07/08	09/10	11/12	13/14	15/16	17/18	19/20	21/22	23/24
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
2		X	X	X	X	X	X	X	X			
3				X	X	X	X	X	X			
4				X	X	X	X	X	X			
5						X	X	X	X	X	X	
6						X	X	X	X	X	X	X

Este cronograma tem uma duração total de 24 semanas, considerando uma dedicação média de 10 horas por semana.

REFERÊNCIAS

BREWER, E. Cap twelve years later: How the "rules" have changed. **Computer**, v. 45, n. 2, p. 23–29, Feb 2012. ISSN 1558-0814.

GILBERT, S.; LYNCH, N. Brewer's conjecture and the feasibility of consistent available partition-tolerant web services. **ACM SIGACT News**, v. 33, 11 2002.

GILBERT, S.; LYNCH, N. Perspectives on the cap theorem. **Computer**, v. 45, n. 2, p. 30–36, 2012.

HALE, C. **You Can't Sacrifice Partition Tolerance**. 2010. Blog post. Disponível em: <https://codahale.com/you-cant-sacrifice-partition-tolerance/>.

LAMPORT, L. Paxos made simple. **ACM SIGACT News (Distributed Computing Column)** **32, 4 (Whole Number 121, December 2001)**, p. 51–58, December 2001. Disponível em: <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/paxos-made-simple/>.

OVERFLOW, S. **Consistency in ACID and CAP Theorem: Are they the same?** 2013. Stack Exchange post. Disponível em: <https://dba.stackexchange.com/questions/31260/consistency-in-acid-and-cap-theorem-are-they-the-same>.

SALOMÉ, S. Brewer's cap theorem. *In*: _____. [s.n.], 2012. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2541318/mod_resource/content/1/TeoremaDeBrewer.pdf.

VOGELS, W. Eventually consistent. **Commun. ACM**, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 52, n. 1, p. 40–44, jan 2009. ISSN 0001-0782. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/1435417.1435432>.