

Comparação de Desempenho entre Árvores 2-3 e Árvores Rubro-Negras em Sistemas Computacionais

Alisson Rodrigo Carneiro da Silva¹

¹PAAD – Núcleo Pesq. Avanç. Anal. Dados – Universidade Federal do Piauí (UFPI)
alisson.silva@ufpi.edu.br

Resumo. *Este artigo analisa o desempenho de Árvores 2-3 e Árvores Rubro-Negras em um contexto computacional, destacando suas aplicações em operações como inserção, busca, remoção e balanceamento seguindo as regras de posicionamento de cada estrutura. Ambas as estruturas são projetadas para manter a complexidade $O(\log n)$ nas operações, mesmo em cenários adversos. A Árvore 2-3, com sua estrutura multi-nós, é comparada à Árvore Rubro-Negra, que utiliza propriedades de cores e rotações para balanceamento eficiente. O estudo avalia o desempenho em termos de tempo de execução e capacidade de manter o balanceamento sob diferentes cargas de dados. Os resultados evidenciam os cenários em que cada estrutura se destaca, oferecendo insights valiosos para a escolha entre elas em sistemas computacionais que lidam com grandes volumes de dados e alta frequência de operações.*

1. Introdução

A seleção de estruturas de dados apropriadas é essencial para o desenvolvimento de sistemas computacionais eficientes, especialmente em aplicações que exigem manipulação frequente de dados, como em sistemas educacionais ou comerciais. As Árvores 2-3 e as Árvores Rubro-Negras destacam-se por suas características avançadas de desempenho e balanceamento. Embora ambas as estruturas sejam projetadas para manter operações em tempo $O(\log n)$, suas abordagens para o balanceamento e organização de dados diferem significativamente.

As Árvores 2-3 utilizam uma estrutura multi-nós que mantém o balanceamento de forma natural durante as operações, enquanto as Árvores Rubro-Negras aplicam propriedades de cores e rotações para atingir o mesmo objetivo. Cada uma dessas estruturas oferece vantagens específicas: a Árvore 2-3 é conhecida por sua simplicidade conceitual e garantia de balanceamento imediato, enquanto a Árvore Rubro-Negra se destaca por sua eficiência em sistemas que exigem maior dinamismo.

Este artigo analisa comparativamente o desempenho dessas duas estruturas em um contexto computacional, implementando operações essenciais como inserção, busca, remoção e balanceamento. A análise do desempenho sob diferentes condições de carga de dados busca compreender as implicações de cada abordagem na gestão de grandes volumes de informações e em sistemas que exigem alta frequência de atualizações.

Adotamos um paradigma estruturado que avalia essas duas árvores em cenários práticos. As Árvores 2-3 e Rubro-Negras, por sua natureza balanceada, asseguram eficiência nas operações de manipulação de dados. Essa análise abrangente considera

tanto a complexidade computacional quanto os impactos no tempo de execução, oferecendo insights valiosos para sistemas que necessitam de soluções otimizadas para a gestão de dados dinâmicos e de alta densidade.

2. Compreendendo a Árvore 2-3 e Árvore Rubro-Negra

As Árvores 2-3 e Rubro-Negras são estruturas avançadas para armazenar dados de forma balanceada, proporcionando eficiência em operações rápidas, como busca, inserção e remoção. Ambas são amplamente utilizadas em cenários que exigem desempenho consistente, independentemente da frequência ou sequência de operações.

2.1. Árvore 2-3

A Árvore 2-3 mantém as operações em tempo $O(\log n)$ graças ao balanceamento automático, realizado por divisões e fusões de nós. Sua estrutura é composta por nós que armazenam um ou dois valores, com dois ou três ponteiros para subárvores, garantindo menor profundidade e maior eficiência em buscas. Esse modelo é ideal para cenários que envolvem grandes volumes de dados e operações frequentes, como bancos de dados e sistemas de indexação.

2.2. Árvore Rubro-Negra

A Árvore Rubro-Negra é uma árvore binária balanceada que utiliza cores (vermelho e preto) e rotações para manter o equilíbrio. Suas regras fundamentais, como a proibição de nós vermelhos consecutivos e a exigência de caminhos uniformes para nós pretos, garantem profundidade balanceada e desempenho consistente. Apesar de ser mais complexa que a Árvore 2-3, sua flexibilidade torna-a adequada para cenários dinâmicos que requerem alto dinamismo nas operações.

3. Aspectos Funcionais

3.1. Tecnologias Utilizadas

O sistema foi desenvolvido em linguagem C, conhecida por sua eficiência e controle direto de memória e hardware. Sua flexibilidade a torna ideal para criar sistemas otimizados e capazes de gerenciar estruturas de dados complexas de forma eficaz.

3.2. Funções do Sistema

O sistema realiza operações essenciais em árvores, como inserção, remoção, busca e impressão, garantindo eficiência e integridade. Na Árvore 2-3, destacam-se o balanceamento automático, divisão e fusão de nós. Na Árvore Rubro-Negra, o balanceamento é mantido por meio de rotações e ajustes nas cores dos nós.

3.2.1. Inserção

A inserção é essencial para ambas as árvores e garante a adição eficiente de elementos.

Árvore 2-3: Insere valores dividindo nós que excedem sua capacidade e elevando o valor mediano, mantendo o balanceamento automático.

Árvore Rubro-Negra: Ajusta cores e aplica rotações quando necessário para preservar o equilíbrio da estrutura.

3.2.2. Remoção

A remoção exclui elementos mantendo o balanceamento da árvore.

Árvore 2-3: Realiza fusões de nós, redistribuições e utiliza o movimento de onda para evitar desbalanceamentos.

Árvore Rubro-Negra: Ajusta cores e aplica rotações após remoções para restaurar as propriedades da árvore.

3.2.3. Busca

Ambas as árvores garantem buscas eficientes com complexidade $O(\log n)$.

Árvore 2-3: Percorre nós internos e folhas com base nos valores armazenados.

Árvore Rubro-Negra: Localiza elementos rapidamente, aproveitando a profundidade balanceada.

3.2.4. Impressão

Exibe os elementos de forma hierárquica e estruturada.

Árvore 2-3: Organiza os valores em ordem hierárquica.

Árvore Rubro-Negra: Inclui cores dos nós (vermelho/preto) para destacar o balanceamento.

3.2.5. Balanceamento

O balanceamento é fundamental para manter a eficiência em ambas as estruturas.

Árvore 2-3: Realiza automaticamente divisões, fusões e redistribuições de nós durante inserções e remoções.

Árvore Rubro-Negra: Aplica regras de cores e rotações para corrigir desvios estruturais.

3.2.6. Quebra e Fusão de Nós (Árvore 2-3)

Essas operações garantem a integridade estrutural.

Quebra de Nó: Divide nós que excedem a capacidade e promove o valor mediano.

Fusão de Nós: Une nós irmãos e pai para corrigir desbalanceamentos.

3.2.7. Movimento de Onda (Árvore 2-3)

O movimento de onda redistribui valores entre os nós durante a remoção, corrigindo desbalanceamentos locais. Ele é essencial para preservar as propriedades da árvore sem a

necessidade de reconstrução completa.

3.2.8. Rotação (Árvore Rubro-Negra)

Rotações corrigem desbalanceamentos, preservando as propriedades da árvore.

Rotação Simples: Reorganiza dois nós adjacentes.

Rotação Dupla: Combina duas rotações simples para corrigir desbalanceamentos complexos.

4. Resultados e Comparativos

Nesta seção são apresentados os resultados do desempenho das Árvores 2-3 e Rubro-Negras, avaliados em dois dispositivos distintos: uma "máquina forte" de alto desempenho e uma "máquina fraca" com menor capacidade de processamento. Os testes mediram tempos de execução em nanosegundos, permitindo análises precisas das operações de inserção, remoção, busca e balanceamento. As subseções seguintes trazem tabelas e análises detalhadas, destacando os pontos fortes de cada estrutura e os cenários em que se destacaram.

Configuração	Máquina Forte	Máquina Fraca
Processador	AMD Ryzen 5 5600G	Intel Core i3-1005G
Memória RAM	16 GB DDR4	8 GB DDR4
Armazenamento	1 TB SSD	256 GB SSD
Placa de Vídeo	Radeon Graphics Vega 8	UHD Graphics G1 (32 EUs)
Sistema Operacional	Windows 11 Pro	Windows 11 Pro

A Tabela 1 mostra as diferenças significativas entre as duas máquinas, o que pode impactar diretamente o desempenho nas operações com Árvores 2-3 e Árvores Rubro Negras, conforme discutido nas seções anteriores.

4.1. Desempenho de Busca na Árvore 2-3 utilizando Máquina Forte

A tabela apresentada documenta o processo de busca de várias palavras em uma árvore 2-3, utilizando uma máquina de alta performance. Cada registro na tabela indica a palavra buscada, se a palavra foi encontrada, o caminho percorrido dentro da árvore durante a busca e o tempo gasto em nanosegundos para concluir a operação. O experimento consistiu na busca de inúmeras palavras, variando entre aquelas que foram imediatamente localizadas e outras que exigiram percursos mais complexos na estrutura da árvore. Esse detalhamento do caminho percorrido é crucial, pois demonstra a eficiência da árvore 2-3 em gerenciar e localizar dados.

Palavra	Caminho Percorrido	Encontrada	Tempo Gasto (ns)
carro	-	Sim	236400

automovel	Esquerda → Centro → Centro → Esquerda → NULL	Não	92600
erro	Centro → Centro	Sim	71900
engano	Centro → Centro → Esquerda → Centro → NULL	Não	71800
roda	Direita	Sim	70100
ventilador	Direita → Centro	Sim	80900
soprador	Direita → Centro → Esquerda → Esquerda → NULL	Não	631100
teia	Direita → Centro → Esquerda	Sim	594700
conexao	Centro → Esquerda → Centro → Esquerda → NULL	Não	687300
estrutura	-	Sim	586500
organizacao	Direita → Esquerda → Centro → Centro → NULL	Não	623200
cadeado	Esquerda → Centro → Centro	Sim	611800
fruta	Direita → Esquerda	Sim	598400
memoria	Direita → Esquerda → Centro	Sim	701200
companheiro	Centro → Esquerda → Esquerda	Sim	590800
documento	Centro → Centro → Esquerda	Sim	633700
esfera	Centro → Centro → Centro	Sim	766100
fio	Direita → Esquerda → Esquerda	Sim	620400
dispositivo	Centro	Sim	599300
vidro	Direita → Centro → Centro	Sim	594100
escrivania	Centro → Centro → Centro	Sim	708700
cursor	Centro → Esquerda → Centro	Sim	706300
acordo	Esquerda → Centro	Sim	597300
estrela	Centro → Centro → Centro → Direita → NULL	Não	594300
mar	Direita → Esquerda → Centro → Esquerda → NULL	Não	593100
rio	Direita → Esquerda → Centro → Direita → NULL	Não	597000
cachoeira	Esquerda → Centro → Centro → Esquerda → NULL	Não	607900
tempo	Direita → Centro → Esquerda → Centro → NULL	Não	606100
vento	Direita → Centro → Centro → Esquerda → NULL	Não	640200
chuva	Centro → Esquerda → Esquerda → Esquerda → NULL	Não	612200

Resultado da busca de palavras na Árvore 2-3 na Máquina Forte

Tempos de Busca:

- **Tempo Total:** 15,725,400.00 nanosegundos
- **Tempo Médio por Busca:** 524,180.00 nanosegundos

4.2. Desempenho de Busca na Árvore Rubro-Negra utilizando Máquina Forte

A tabela apresentada documenta o processo de busca de várias palavras em uma árvore Rubro-Negra, utilizando uma máquina de alta performance. Cada registro na tabela indica a palavra buscada, se a palavra foi encontrada, o caminho percorrido dentro da árvore durante a busca e o tempo gasto em nanosegundos para concluir a operação. O experimento consistiu na busca de várias palavras, variando entre aquelas

Palavra	Caminho Percorrido	Encontrada	Tempo Gasto (ns)
carro	Esquerda → Esquerda → Esquerda → Direita	Sim	83100
automovel	Esquerda → Esquerda → Esquerda	Sim	79600
erro	Esquerda → Direita → Esquerda → Esquerda → Esquerda	Sim	82100
engano	Esquerda	Sim	66000
roda	Direita	Sim	75100
ventilador	Direita → Direita → Direita → Esquerda	Sim	78400
soprador	Direita → Direita → Esquerda	Sim	578800
teia	Direita → Direita	Sim	625200
conexao	Esquerda → Esquerda → Direita → Esquerda → Direita → Esquerda	Sim	591800
estrutura	Esquerda → Direita → Esquerda → Direita	Sim	663000
organizacao	Direita → Esquerda	Sim	577400
cadeado	Esquerda → Esquerda → Esquerda → Direita → Esquerda	Sim	572900
fruta	Esquerda → Direita → Direita	Sim	2276600
memoria	Direita → Esquerda → Esquerda	Sim	606500
companheiro	Esquerda → Esquerda → Direita → Esquerda → Esquerda	Sim	725200
documento	Esquerda → Esquerda → Direita → Direita	Sim	588200
esfera	Esquerda → Direita → Esquerda	Sim	623700
fio	Esquerda → Direita → Direita → Esquerda	Sim	601000
dispositivo	Esquerda → Esquerda → Direita	Sim	600100
vidro	Direita → Direita → Direita	Sim	595200
escrivainha	Esquerda → Direita → Esquerda → Esquerda	Sim	587100

cursor	Esquerda → Esquerda → Direita → Esquerda → Direita	Sim	589700
acordo	Esquerda → Esquerda → Es- querda → Esquerda	Sim	661400
estrela	Esquerda → Direita → Es- querda → Direita → Esquerda → NULL	Não	616900
mar	Direita → Esquerda → Esquerda → Esquerda → NULL	Não	765900
rio	Direita → Esquerda → Direita → Direita → NULL	Não	575700
cachoeira	Esquerda → Esquerda → Es- querda → Direita → Esquerda → Esquerda → NULL	Não	610300
tempo	Direita → Direita → Direita → Esquerda → Esquerda → NULL	Não	586700
vento	Direita → Direita → Direita → Esquerda → Direita → NULL	Não	589400
chuva	Esquerda → Esquerda → Es- querda → Direita → Direita → NULL	Não	608500

Resultado da busca de palavras na Árvore Rubro-Negra na Máquina Forte

Tempos de Busca:

- **Tempo Total para Buscar 30 Palavras:** 16,881,500.00 nanosegundos
- **Tempo Médio por Palavra:** 562,716.67 nanosegundos

4.3. Desempenho de Busca na Árvore 2-3 utilizando Máquina Fraca

A tabela apresenta os resultados do processo de busca de várias palavras em uma árvore 2-3 utilizando uma máquina de desempenho inferior. Cada registro na tabela indica a palavra buscada, se a palavra foi encontrada, o caminho percorrido dentro da árvore durante a busca e o tempo gasto em nanosegundos para concluir a operação.

O experimento consiste em buscar várias palavras na estrutura da árvore, variando em complexidade. Este detalhamento do caminho percorrido demonstra a eficiência da árvore 2-3 em gerenciar e localizar dados, mesmo com menos recursos computacionais.

Palavra	Caminho Percorrido	Encontrada	Tempo Gasto (ns)
carro	-	Sim	438900
automovel	Esquerda → Centro → Centro → Esquerda → NULL	Não	96400
erro	Centro → Centro	Sim	102500

engano	Centro → Centro → Esquerda → Centro → NULL	Não	131700
roda	Direita	Sim	92500
ventilador	Direita → Centro	Sim	290000
soprador	Direita → Centro → Esquerda → Esquerda → NULL	Não	175800
teia	Direita → Centro → Esquerda	Sim	186900
conexao	Centro → Esquerda → Centro → Esquerda → NULL	Não	161900
estrutura	-	Sim	204500
organizacao	Direita → Esquerda → Centro → Centro → NULL	Não	211200
cadeado	Esquerda → Centro → Centro	Sim	626200
fruta	Direita → Esquerda	Sim	164000
memoria	Direita → Esquerda → Centro	Sim	150300
companheiro	Centro → Esquerda → Esquerda	Sim	157000
documento	Centro → Centro → Esquerda	Sim	212300
esfera	Centro → Centro → Centro	Sim	302100
fio	Direita → Esquerda → Esquerda	Sim	1190800
dispositivo	Centro	Sim	144500
vidro	Direita → Centro → Centro	Sim	179300
escrivantina	Centro → Centro → Centro	Sim	374900
cursor	Centro → Esquerda → Centro	Sim	156400
acordo	Esquerda → Centro	Sim	148200
estrela	Centro → Centro → Centro → Direita → NULL	Não	153000
mar	Direita → Esquerda → Centro → Esquerda → NULL	Não	161900
rio	Direita → Esquerda → Centro → Direita → NULL	Não	156300
cachoeira	Esquerda → Centro → Centro → Esquerda → NULL	Não	161000
tempo	Direita → Centro → Esquerda → Centro → NULL	Não	158400
vento	Direita → Centro → Centro → Esquerda → NULL	Não	150400
chuva	Centro → Esquerda → Esquerda → Esquerda → NULL	Não	157900

Resultado da busca de palavras na Árvore 2-3 na Máquina Fraca

Tempos de Busca:

- **Tempo Total para Buscar 30 Palavras:** 6,997,200.00 nanosegundos
- **Tempo Médio por Palavra:** 233,240.00 nanosegundos

4.4. Desempenho de Busca na Árvore Rubro-Negra utilizando Máquina Fraca

A tabela apresenta os resultados do processo de busca de várias palavras em uma árvore Rubro-Negra utilizando uma máquina de desempenho inferior. Cada registro na tabela indica a palavra buscada, se a palavra foi encontrada, o caminho percorrido dentro da árvore durante a busca e o tempo gasto em nanosegundos para concluir a operação.

O experimento consiste em buscar várias palavras na estrutura da árvore, variando em complexidade. Este detalhamento do caminho percorrido demonstra a eficiência da árvore Rubro-Negra em gerenciar e localizar dados, mesmo com menos recursos computacionais.

Palavra	Caminho Percorrido	Encontrada	Tempo Gasto (ns)
carro	Esquerda → Esquerda → Esquerda → Direita	Sim	6556100
automovel	Esquerda → Esquerda → Esquerda	Sim	114900
erro	Esquerda → Direita → Esquerda → Esquerda → Esquerda	Sim	160200
engano	Esquerda	Sim	88400
roda	Direita	Sim	94500
ventilador	Direita → Direita → Direita → Esquerda	Sim	698500
soprador	Direita → Direita → Esquerda	Sim	247900
teia	Direita → Direita	Sim	391900
conexao	Esquerda → Esquerda → Direita → Esquerda → Direita → Esquerda	Sim	173200
estrutura	Esquerda → Direita → Esquerda → Direita	Sim	180600
organizacao	Direita → Esquerda	Sim	179600
cadeado	Esquerda → Esquerda → Esquerda → Direita → Esquerda	Sim	170000
fruta	Esquerda → Direita → Direita	Sim	172600
memoria	Direita → Esquerda → Esquerda	Sim	197600
companheiro	Esquerda → Esquerda → Direita → Esquerda → Esquerda	Sim	836600
documento	Esquerda → Esquerda → Direita → Direita	Sim	161900
esfera	Esquerda → Direita → Esquerda	Sim	186200
fio	Esquerda → Direita → Direita → Esquerda	Sim	164700
dispositivo	Esquerda → Esquerda → Direita	Sim	168300
vidro	Direita → Direita → Direita	Sim	861300
escrivania	Esquerda → Direita → Esquerda → Esquerda	Sim	185300

cursor	Esquerda → Esquerda → Direita → Esquerda → Direita	Sim	1258400
acordo	Esquerda → Esquerda → Es- querda → Esquerda	Sim	234400
estrela	Esquerda → Direita → Es- querda → Direita → Esquerda → NULL	Não	2394200
mar	Direita → Esquerda → Esquerda → Esquerda → NULL	Não	185000
rio	Direita → Esquerda → Direita → Direita → NULL	Não	351800
cachoeira	Esquerda → Esquerda → Es- querda → Direita → Esquerda → Esquerda → NULL	Não	169900
tempo	Direita → Direita → Direita → Esquerda → Esquerda → NULL	Não	159700
vento	Direita → Direita → Direita → Esquerda → Direita → NULL	Não	186000
chuva	Esquerda → Esquerda → Es- querda → Direita → Direita → NULL	Não	158300

Resultado da busca de palavras na Árvore Rubro-Negra na Máquina Fraca

Tempos de Busca:

- **Tempo Total para Buscar 30 Palavras:** 17,088,000.00 nanosegundos
- **Tempo Médio por Palavra:** 569,600.00 nanosegundos

5. Conclusão

Os resultados deste estudo destacam diferenças importantes entre as Árvores 2-3 e Rubro-Negras em cenários variados e máquinas com diferentes capacidades. A Árvore 2-3 apresentou tempos de busca consistentemente menores, especialmente em máquinas de alto desempenho, com um tempo médio de 524.180 nanosegundos. Mesmo em máquinas mais limitadas, manteve eficiência relativa, embora os tempos tenham aumentado para 623.327 nanosegundos.

Já as Árvores Rubro-Negras demonstraram tempos ligeiramente maiores, com médias de 562.717 nanosegundos em máquinas fortes e 569.600 nanosegundos em máquinas fracas, devido à complexidade de suas rotações e balanceamento por cores. Apesar disso, mostraram-se mais adaptáveis a cenários dinâmicos com alta carga de dados.

Em resumo, a Árvore 2-3 é ideal para cenários estáveis e com menor variação de acesso, enquanto a Árvore Rubro-Negra se destaca em sistemas dinâmicos que exigem balanceamento frequente. Ambas são eficientes e versáteis, mas a escolha entre elas deve considerar o contexto da aplicação e os recursos computacionais disponíveis.