

Uma Proposta de Reorganização Adaptativa pelo Fator de Impacto para o VCube

Luiz Antonio Rodrigues¹, Anubis Rossetto², Paulo Coelho³,
Luciana Arantes⁴, Pierre Sens⁴ e Elias P. Duarte Jr.⁵

¹UNIOESTE – Cascavel/PR – Brasil

²IFSul – Passo Fundo/RS – Brasil

³UFU – Uberlândia/MG – Brasil

⁴Sorbonne Université/LIP6 – Paris – França

⁵UFPR – Curitiba/PR – Brasil

luiz.rodriques@unioeste.br

Resumo. Detectores de falhas tradicionais assumem que todos os processos têm importância uniforme, ignorando diferenças de criticidade presentes em sistemas distribuídos modernos. O Impact Failure Detector (ImpactFD) atribui fatores de impacto à processos para quantificar suas respectivas relevâncias, mas não utiliza essa informação na organização estrutural dos processos. Enquanto isso, o VCube oferece diagnóstico escalável baseado em hipercubo sem considerar criticidade. Este trabalho propõe o Impact-VCube, um mecanismo de reorganização adaptativa que integra fatores de impacto ao posicionamento dos processos no VCube. Resultados experimentais mostram que o Impact-VCube pode reduzir significativamente a latência ponderada, preservando a complexidade assintótica do detector. Os ganhos crescem proporcionalmente à assimetria dos impactos, confirmando que a reorganização geométrica do VCube reduz o esforço estrutural e o tempo até a confiança esperada.

1. Introdução

A tolerância a falhas é um requisito essencial para a construção de sistemas distribuídos confiáveis. Em ambientes sujeitos a falhas por crash e atrasos arbitrários na comunicação, mecanismos de detecção de falhas tornam-se fundamentais para viabilizar protocolos de consenso, replicação e coordenação distribuída [Duarte et al. 2023].

O modelo clássico de detectores de falhas, introduzido por Chandra e Toueg (1996), formaliza detectores como oráculos distribuídos caracterizados por propriedades de completude e acurácia. Esse modelo estabeleceu a base teórica para o desenvolvimento de detectores adaptativos, como o ϕ -accrual failure detector [Hayashibara et al. 2004], amplamente utilizado em sistemas reais.

Entretanto, a maioria dos detectores tradicionais assume implicitamente que todos os processos possuem importância uniforme. Em sistemas contemporâneos, como infraestruturas em nuvem, plataformas *blockchain* e arquiteturas baseadas em microsserviços, essa suposição pode ser inadequada, uma vez que determinados processos exercem papel estruturalmente mais relevante que outros.

O *Impact Failure Detector* (ImpactFD) [Rossetto et al. 2018] introduziu uma abordagem baseada em relevância, atribuindo fatores de impacto aos processos e calculando um nível de confiança agregado. Diferentemente de detectores binários tradicionais, o ImpactFD permite tolerar margens de falhas desde que a soma dos fatores de impacto dos processos não suspeitos de falha seja maior ou igual a um limiar definido. Nesse modelo, a suspeita de falha de um conjunto de processos é interpretada com base na soma de seus impactos, oferecendo uma visão quantitativa da degradação sistêmica. Entretanto, sua proposta concentra-se na semântica da confiança e não aborda a reorganização estrutural do monitoramento.

Paralelamente, topologias estruturadas são frequentemente empregadas para garantir monitoramento escalável. Neste contexto, o VCube [Duarte et al. 2023] organiza os processos em uma estrutura lógica de hipercubo, possibilitando detecção distribuída com complexidade logarítmica e balanceamento eficiente da carga de monitoramento. Contudo, o VCube tradicional assume distribuição uniforme de importância entre os processos e não considera informações quantitativas sobre criticidade.

Assim, este trabalho propõe o Impact-VCube, um mecanismo de reorganização adaptativa do hipercubo sensível ao fator de impacto dos processos. A ideia central é posicionar processos proporcionalmente ao seu peso de impacto em regiões estruturalmente mais centrais da topologia, reduzindo a latência ponderada de detecção e aumentando a robustez sob falhas direcionadas. Como etapa inicial, apresentamos um modelo centralizado de reorganização, utilizado como prova de conceito para avaliar os ganhos potenciais da adaptação topológica baseada em fator de impacto. Foram realizados experimentos considerando diferentes número de processos e distribuições de pesos.

As principais contribuições deste trabalho são:

- A definição de um mecanismo de reorganização adaptativa do VCube baseado em fatores de impacto;
- A implementação de um modelo centralizado para validação experimental;
- Uma avaliação preliminar demonstrando redução significativa na latência ponderada sob diferentes cenários de falha.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta a fundamentação teórica, revisando o modelo clássico de detectores de falhas, o ImpactFD e a estrutura do VCube. A Seção 3 introduz o Impact-VCube, apresentando o algoritmo, formalizando o problema de reorganização sensível a impacto e definindo a função objetivo a ser minimizada. A Seção 4 descreve a metodologia experimental. A Seção 5 apresenta e discute os resultados em diferentes distribuições. Os trabalhos relacionados são apresentados na Seção 6. Por fim, a Seção 7 apresenta a conclusão e os trabalhos futuros.

2. Fundamentação Teórica

Esta seção apresenta os conceitos fundamentais que sustentam a proposta do Impact-VCube, partindo do modelo clássico de detectores de falhas e, em seguida, apresentando o Impact Failure Detector e o VCube.

2.1. Detectores de Falhas Não Confiáveis

Chandra e Toueg (1996) formalizaram detectores de falhas como oráculos distribuídos que fornecem informação sobre suspeitas de falha de processos. Esses detectores são caracterizados por propriedades de *precisão* e *acurácia*. A completude garante que processos que falham eventualmente serão suspeitados por todos os processos corretos. A acurácia, por sua vez, limita a suspeita incorreta de processos corretos. Diferentes classes de detectores são definidas combinando variações dessas propriedades.

Posteriormente, detectores do tipo *accrual* foram propostos para oferecer uma saída quantitativa ao invés de binária. O ϕ -accrual failure detector [Hayashibara et al. 2004], por exemplo, associa a cada processo um valor contínuo que representa o nível de suspeita com base na distribuição estatística dos tempos de chegada de mensagens. Essa abordagem permite maior flexibilidade na tomada de decisão por aplicações distribuídas.

2.2. Impact Failure Detector

O *Impact Failure Detector* (Impact FD) [Rossetto et al. 2018] introduz uma abordagem baseada na relevância dos processos. Cada processo p_i possui um fator de impacto associado $I_i > 0$, que representa sua importância relativa no sistema.

Diferentemente dos modelos tradicionais, o Impact FD não fornece uma saída binária por processo. Em vez disso, define um nível de confiança global no sistema calculado como:

$$Trust(t) = \sum_{p_i \in \mathcal{T}(t)} I_i \quad (1)$$

onde $\mathcal{T}(t)$ representa o conjunto de processos não suspeitos no instante t .

Um parâmetro de limiar θ define o nível mínimo aceitável de confiança. O sistema é considerado confiável enquanto $Trust(t) \geq \theta$.

Este modelo permite tolerar margens de falhas ou falsas suspeitas desde que a soma dos fatores de impacto dos processos não suspeitos de falha não seja inferior ao limiar estabelecido. O Impact FD é particularmente adequado para sistemas com redundância, heterogeneidade ou organização em *clusters*, nos quais diferentes componentes contribuem de maneira distinta para a confiabilidade global.

Entretanto, o ImpactFD não define mecanismos específicos para reorganização estrutural do sistema com base nos fatores de impacto. Ele atua na interpretação da confiabilidade, mas não na adaptação da topologia de monitoramento.

2.3. VCube

O VCube [Duarte et al. 2023] organiza os processos em uma topologia de hipercubo virtual, definindo *clusters* lógicos progressivamente maiores e comunicação direta apenas entre vizinhos. O VCube pode ser utilizado em sistemas assíncronos [Jeanneau et al. 2017]. O VCube já foi utilizado em diversos contextos, incluindo sistemas de gerência de redes [Duarte and De Bona 2002], exclusão mútua distribuída [Rodrigues et al. 2018] e para a construção de quoruns em sistemas distribuídos

[Rodrigues et al. 2016]. Para cada processo p e nível $s \in \{1, \dots, d\}$, define-se o cluster $c_{i,s}$ contendo 2^{s-1} processos. Os clusters são definidos recursivamente de acordo com a Equação 2 (\oplus representa a operação XOR bit a bit):

$$c_{i,s} = \{i \oplus 2^{s-1}, c_{i \oplus 2^{s-1}, 1}, \dots, c_{i \oplus 2^{s-1}, s-1}\} \quad (2)$$

Para cada processo i e nível s , existe uma aresta (i, j) , se i é o primeiro processo correto na lista ordenada $c_{j,s}$.

3. Impact-VCube

Esta seção apresenta o Impact-VCube, um detector de falhas com reorganização adaptativa baseado no fator de impacto dos processos. Inicialmente, é apresentado o modelo de sistema e, em seguida, o problema de reorganização sensível ao fator de impacto é formalizado. Por fim, apresenta-se o algoritmo centralizado utilizado como prova de conceito.

3.1. Modelo de Sistema

Considera-se um sistema distribuído baseado em troca de mensagens, composto por $n = 2^d$ processos físicos $\Pi = \{p_0, \dots, p_{n-1}\}$, organizados em um VCube de dimensão $d \geq 1$.

Cada processo $p \in \Pi$ possui um identificador lógico binário:

$$id(p) \in \{0, 1\}^d = (id_1(p), id_2(p), \dots, id_d(p)) \quad (3)$$

onde $id_i(p) \in \{0, 1\}$ representa o i -ésimo bit do identificador do processo.

A distância entre dois processos é definida como a distância de Hamming. Para $p, q \in \{0, 1\}^d$:

$$d_H(p, q) = \sum_{i=1}^d |id_i(p) - id_i(q)| \quad (4)$$

No VCube, $d_H(p, q)$ corresponde ao número mínimo de arestas entre p e q , e a distância até a raiz lógica r é $d_H(p, r)$.

O sistema segue o modelo temporal parcialmente síncrono com *Global Stabilization Time* (GST). Após o instante de tempo GST, existe um limite superior Δ para o tempo de transmissão de mensagens e processamento.

Processos podem sofrer falha de parada (*crash*) e não se recuperam. Um processo é considerado correto se não falha durante a execução. Seja $correct \subseteq \Pi$ o conjunto de processos corretos. Assume-se que o número de falhas é finito e que, após GST, todos os processos corretos conseguem se comunicar entre si dentro do limite Δ .

Cada processo físico possui um identificador estável $phys(p)$ (por exemplo, endereço IP). A topologia do VCube é definida sobre identificadores lógicos binários, e a reorganização calcula um mapeamento $M_t : correct \rightarrow \{0, 1\}^d$, no instante t , que associa cada processo físico $phys(p)$ a uma posição lógica $id(p)$ no hipercubo.

3.2. Objetivo de Otimização

Seja $I(p)$ o fator de impacto do processo p , e $d_H(p, r)$ a distância de Hamming entre o processo p e a raiz lógica r .

O objetivo do Impact-VCube é calcular um mapeamento entre processos físicos e identificadores lógicos do hipercubo que minimize Φ :

$$\Phi = \sum_{p \in \Pi} I(p) \cdot d_H(p, r) \quad (5)$$

Isto reduz a latência esperada de detecção ponderada por impacto, posicionando processos críticos mais próximos da raiz lógica.

Seja a função de impacto acumulado até profundidade h como:

$$F(h) = \sum_{\substack{p \in \Pi \\ d_H(p, r) \leq h}} I(p) \quad (6)$$

onde I_{total} é o impacto total dos processos corretos:

$$I_{total} = \sum_{p \in correct} I(p) \quad (7)$$

Dado um limiar $\theta \in (0, I_{total}]$, define-se a profundidade mínima necessária como:

$$D_\theta = \min \{h \in \{0, \dots, d-1\} \mid F(h) \geq \theta\}. \quad (8)$$

A métrica D_θ representa o menor raio métrico em torno da raiz que contém um conjunto de fatores de impacto cuja soma é suficiente para ultrapassar o limiar de confiança θ . Ou seja, enquanto Φ mede o momento ponderado da distribuição de impacto em relação à raiz, D_θ mede o raio mínimo necessário para acumular uma fração crítica desse total.

Assim, a minimização de Φ tende a reduzir D_θ , pois concentra maior impacto em menores distâncias de Hamming.

3.3. Algoritmo de Reorganização Centralizado

Considere que o fator de impacto está associado a cada processo físico e é compartilhado entre os processos vizinhos do VCube. Após receberem os valores do fator de impacto de todos os processos corretos, cada processo pode calcular localmente a nova função de mapeamento M_t , que define a posição lógica de cada processo físico no VCube, executando as seguintes etapas periodicamente (Algoritmo 1):

1. Os processos são ordenados de acordo com seu fator de impacto $I(p)$.
2. As posições do hipercubo são ordenadas conforme sua proximidade à raiz.
3. Uma atribuição gulosa associa processos de maior impacto a posições com menor distância de Hamming.

Algorithm 1 Reorganização Global do Impact-VCube

- 1: Obter $I(p)$ para todo $p \in correct$
 - 2: $L_N \leftarrow$ processos ordenados por $I(p)$ decrescente
 - 3: $L_{ID} \leftarrow$ identificadores ordenados por $d_H(id, r)$ crescente
 - 4: **for** $i = 0$ até $n - 1$ **do**
 - 5: Atribuir $L_N[i] \rightarrow L_{ID}[i]$
 - 6: **end for**
-

Considere, como exemplo, um VCube tridimensional ($d = 3, n = 8$) com raiz lógica 000 (Figura 1a). A Tabela apresenta os processos físicos, seus identificadores lógicos iniciais e os respectivos fatores de impacto:

Processo físico p	ID físico (IP)	ID lógico inicial	Fator de Impacto
p_0	2001:db8::1	000	0,0256
p_1	2001:db8::2	001	0,0513
p_2	2001:db8::3	010	0,0769
p_3	2001:db8::4	011	0,1026
p_4	2001:db8::5	100	0,1282
p_5	2001:db8::6	101	0,1538
p_6	2001:db8::7	110	0,2051
p_7	2001:db8::8	111	0,2564

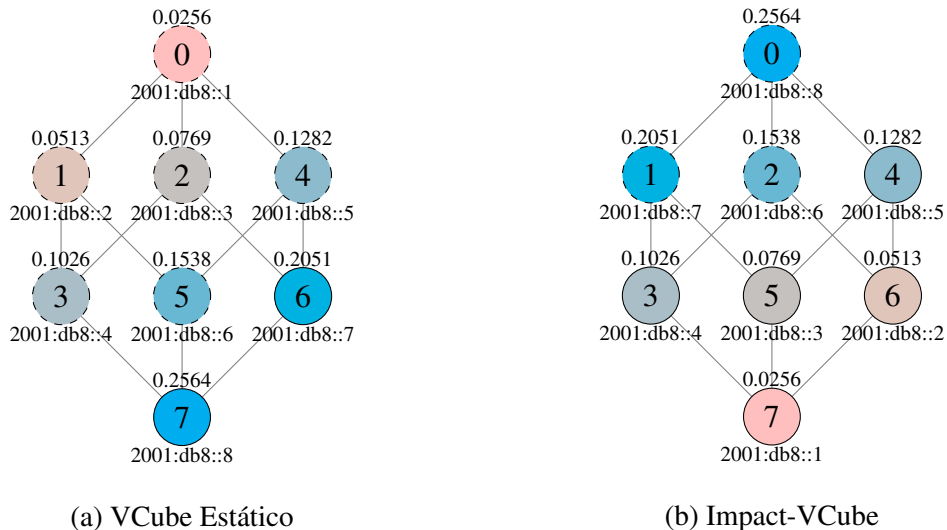


Figura 1. Os rótulos dos nós (0–7) representam posições lógicas do hipercubo. A coloração azul (maior) \rightarrow vermelho (menor) representa o fator de impacto do processo físico mapeado para cada posição lógica. Processos com borda tracejada pertencem ao subconjunto mínimo necessário para que o impacto acumulado ultrapasse 0,5.

O potencial global inicial é:

$$\begin{aligned}
 \Phi_0 &= \sum_{p \in \Pi} I(p) \cdot d_H(p, 000) \\
 &= 0,0256 \cdot 0 + 0,0513 \cdot 1 + 0,0769 \cdot 1 + 0,1026 \cdot 2 \\
 &\quad + 0,1282 \cdot 1 + 0,1538 \cdot 2 + 0,2051 \cdot 2 + 0,2564 \cdot 3 \\
 &= 0 + 0,0513 + 0,0769 + 0,2052 \\
 &\quad + 0,1282 + 0,3076 + 0,4102 + 0,7692 \\
 &= 1,9486
 \end{aligned}$$

Considerando um limiar $\theta = 0.5$, por exemplo, a profundidade mínima a partir da raiz para atingir o limiar é $D_0 = 2$ (processos 0, 1, 2, 3, 4, e 5 da Figura 1a).

Após a execução do Algoritmo 1, o potencial global torna-se:

$$\begin{aligned}
 \Phi_1 &= 0,2564 \cdot 0 + 0,2051 \cdot 1 + 0,1538 \cdot 1 + 0,1282 \cdot 1 \\
 &\quad + 0,1026 \cdot 2 + 0,0769 \cdot 2 + 0,0513 \cdot 2 + 0,0256 \cdot 3 \\
 &= 0 + 0,2051 + 0,1538 + 0,1282 \\
 &\quad + 0,2052 + 0,1538 + 0,1026 + 0,0768 \\
 &= 1,0255
 \end{aligned}$$

Com isso, o ganho relativo é de 47,7% e o número de níveis para se atingir $\theta = 0,5$ é reduzido para $D_0 = 1$ (processos 0, 1 e 2 da Figura 1b).

Portanto, neste exemplo, na configuração original o limiar de confiança é atingido apenas após a inclusão de processos até a segunda camada do VCube. Já no Impact-VCube, a concentração dos maiores impactos nas camadas internas permite que o mesmo limiar seja atingido ainda na primeira camada, reduzindo estruturalmente o tempo necessário para estabilização do sistema.

Teorema 1 (Otimidade). *A atribuição proposta pelo Algoritmo 1 minimiza a função objetivo Φ .*

Esboço da Prova. Sejam $a_i = I(p_i)$ e $b_i = d_H(h_i, r)$, onde $\{a_i\}$ está ordenado em ordem decrescente e $\{b_i\}$ em ordem crescente.

A função objetivo pode ser escrita como $\Phi = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot b_{\sigma(i)}$, para alguma permutação σ .

Pela Desigualdade do Rearranjo [Steele 2004], a soma $\sum a_i b_{\sigma(i)}$ é minimizada quando os maiores elementos de uma sequência são pareados com os menores da outra.

Logo, associar processos de maior impacto aos identificadores mais próximos da raiz produz o mínimo global de Φ . \square

4. Metodologia Experimental

Esta seção descreve o ambiente experimental, os cenários avaliados, as métricas utilizadas e os procedimentos estatísticos adotados para validar a hipótese de reorganização sensível

a impacto. O objetivo é avaliar se a reorganização topológica proposta pelo Impact-VCube reduz a latência ponderada de detecção em comparação com o VCube original.

4.1. Ambiente de Simulação

Os experimentos foram conduzidos em um simulador desenvolvido especificamente para modelar o comportamento do algoritmo de diagnóstico do VCube e sua versão adaptativa. Foram considerados sistemas com $n = 2^d$ processos, para $d \in [3, 10]$ (são de 8 até 1024 processos). Cada configuração foi executada 100 vezes para obtenção de médias e intervalos de confiança. Os intervalos de confiança de 95% foram calculados como $1.96 \cdot \sigma / \sqrt{100}$, sendo σ o desvio padrão.

4.2. Distribuições do Fator de Impacto

Para avaliar diferentes níveis de heterogeneidade, foram considerados três distribuições de pesos:

1. **Aleatória:** $I_i = rand(n) / \sum(I)$;
2. **Zipf:** $I_i \propto 1/i^\alpha$, com $\alpha = 1$; lei de potência inversa, garantindo que o peso mais alto esteja na primeira posição e o mais baixo na última posição.
3. **Concentrada:** os 10% processos principais recebem 60% da massa de probabilidade total e os 90% elementos restantes compartilham os 40% restantes.

Os pesos foram normalizados de modo que $\sum_{i=0}^{n-1} I_i = 1$

5. Resultados Experimentais

Esta seção apresenta a avaliação quantitativa da função objetivo definida na Equação 5. O objetivo dos experimentos é verificar se o mapeamento baseado no fator de impacto proposto pelo Impact-VCube reduz o custo estrutural ponderado Φ quando comparado a um mapeamento aleatório de processos no espaço de identificadores do hipercubo.

Além da redução do custo estrutural Φ , foram avaliadas as métricas diretamente relacionadas ao modelo do ImpactFD: o número médio de processos por ordem crescente de distância até a raiz e a profundidade máxima necessários para que o sistema atinja $Trust \geq 0,5$.

5.1. Distribuição Aleatória

A Tabela 1 apresenta os resultados da função objetivo com base na distribuição aleatória. De forma geral, observa-se que o ganho estrutural é proporcional ao grau de heterogeneidade da distribuição do fator de impacto, apresentando redução moderada e estável. Os ganhos estruturais variam de 28,60% (para $n = 8$) até 17,60% (para $n = 1024$), apresentando tendência decrescente com o aumento de n .

Como os fatores de impacto são aproximadamente homogêneos, $I(p) \approx 1/n$, a minimização de Φ equivale essencialmente à minimização da distância média. Neste cenário, a reorganização baseada em fator de impacto não altera significativamente a distribuição radial da massa total, resultando em ganhos moderados e estruturalmente limitados.

Ainda neste cenário, observa-se na Tabela 2 que o Impact-VCube ainda promove reduções consistentes no número médio de processos necessários para atingir $Trust \geq$

Tabela 1. Custo estrutural Φ (média \pm IC95%) e ganho — Fatores de Impacto Aleatórios

n	Φ_{Random}	$\Phi_{Impact-VCube}$	Ganho (%)
8	1,5034 \pm 0,1740	1,0734 \pm 0,1114	28,60
16	2,0061 \pm 0,1492	1,4679 \pm 0,0979	26,83
32	2,4834 \pm 0,1261	1,8831 \pm 0,0723	24,18
64	2,9978 \pm 0,0793	2,3370 \pm 0,0610	22,04
128	3,5018 \pm 0,0730	2,7696 \pm 0,0483	20,91
512	4,5014 \pm 0,0342	3,6719 \pm 0,0259	18,43
1024	5,0005 \pm 0,0293	4,1206 \pm 0,0204	17,60

0,5. Para $n = 1024$, o número médio de processos reduz-se de 513,36 para 308,06, correspondendo a um ganho aproximado de 39,97%.

De forma semelhante, a profundidade média necessária é reduzida de 5,00 para 4,00, indicando que o limiar de confiança é alcançado uma camada antes em relação ao VCube original. Como os impactos são aproximadamente homogêneos, a reorganização baseada no fator de impacto não altera significativamente a distribuição radial da massa total. Assim, a redução observada decorre apenas da melhor ordenação relativa dos processos, e não de uma concentração estrutural pronunciada. Este comportamento confirma que o benefício do Impact-VCube é proporcional ao grau de heterogeneidade dos fatores de impacto, sendo mais modesto quando os estes têm valores uniformes.

Tabela 2. Eficiência até $Trust \geq 0,5$ — Distribuição Aleatória

n	Processos			Profundidade		
	VCube	Impact-VCube	Ganho (%)	VCube	Impact-VCube	Ganho (%)
8	4,49	3,13	30,29	1,45	1,00	31,03
16	8,51	5,27	38,07	2,00	1,30	35,00
32	16,54	10,35	37,43	2,48	2,00	19,35
64	32,50	19,86	38,89	3,00	2,01	33,00
128	64,71	39,47	39,01	3,52	3,00	14,77
512	256,53	154,59	39,74	4,55	4,00	12,09
1024	513,36	308,06	39,97	5,00	4,00	20,00

5.2. Distribuição Zipf

Na distribuição Zipf, a Tabela 3 mostra que os ganhos aumentam monotonicamente com n , atingindo 53,42% para $n = 1024$. Neste caso, poucos processos concentram grande parte do total dos valores dos fatores de impacto. Ao reposicionar esses processos em menores distâncias de Hamming, o Impact-VCube reduz drasticamente o termo dominante da soma ponderada.

Do ponto de vista estrutural, a reorganização concentra a soma mais significativa dos valores dos fatores de impacto nas camadas internas do hipercubo, reduzindo fortemente o momento ponderado. Esse comportamento confirma que o ganho estrutural aumenta à medida que cresce a heterogeneidade da distribuição.

O crescimento do ganho com n demonstra que o benefício estrutural da reorganização do Impact-VCube escala favoravelmente em sistemas de grande porte.

Tabela 3. Custo estrutural Φ (média \pm IC95%) e ganho — Zipf

n	Φ_{Random}	$\Phi_{Impact-VCube}$	Ganho (%)
8	1,4889 \pm 0,2783	0,9115 \pm 0,0000	38,78
16	1,9958 \pm 0,2838	1,1540 \pm 0,0000	42,18
32	2,5294 \pm 0,2866	1,3749 \pm 0,0000	45,64
64	3,0036 \pm 0,2662	1,5801 \pm 0,0000	47,39
128	3,4699 \pm 0,2858	1,7738 \pm 0,0000	48,88
512	4,5160 \pm 0,2805	2,1378 \pm 0,0000	52,66
1024	4,9628 \pm 0,2528	2,3117 \pm 0,0000	53,42

A Tabela 4 apresenta os resultados para eficiência na obtenção do limiar de confiança. Neste cenário, o Impact-VCube apresenta ganhos substanciais em todas as escalas avaliadas. Para $n = 1024$, o número médio de processos necessários para atingir $Trust \geq 0,5$ reduz-se de 416,60 para 24,00, correspondendo a um ganho de 94,24%.

Adicionalmente, a profundidade média necessária cai de aproximadamente 4,99 para apenas 2,00, indicando que o limiar de confiança é atingido duas camadas antes em comparação ao VCube original.

Diferentemente da distribuição aleatória, a assimetria estrutural da Zipf amplifica o efeito da minimização de Φ , resultando em reduções quase lineares no esforço necessário para estabilização.

Estes resultados reforçam a hipótese de que quanto maior a heterogeneidade da distribuição dos fatores de impacto, maior o benefício estrutural da reorganização proposta.

Tabela 4. Eficiência até $Trust \geq 0,5$ — Distribuição Zipf

n	Processos			Profundidade		
	VCube	Impact-VCube	Ganho (%)	VCube	Impact-VCube	Ganho (%)
8	3,81	2,00	47,51	1,41	1,00	29,08
16	7,32	3,00	59,02	2,00	1,00	50,00
32	14,05	4,00	71,53	2,55	1,00	60,78
64	26,80	6,00	77,61	2,96	1,00	66,22
128	50,30	8,00	84,09	3,42	1,00	70,76
512	213,01	17,00	92,02	4,52	2,00	55,75
1024	416,60	24,00	94,24	4,99	2,00	59,92

5.3. Distribuição Concentrada

Na distribuição concentrada, na qual 10% dos processos acumulam 60% do impacto, observa-se ganho máximo de 57,70% para $n = 16$, decrescendo gradualmente até 29,70% para $n = 1024$ (Tabela 5). Em sistemas menores, a concentração dos fatores de impacto permite forte redução do custo estrutural. Entretanto, à medida que n cresce, a fração residual de impacto distribuída em camadas externas passa a dominar a soma ponderada, limitando o ganho percentual.

Na Tabela 6, observa-se que o Impact-VCube reduz significativamente o número médio de processos necessários para atingir $Trust \geq 0,5$ em todas as escalas avaliadas.

Tabela 5. Custo estrutural Φ (média \pm desvio) e ganho percentual — Distribuição Concentrada

n	Φ_{Random}	$\Phi_{Impact-VCube}$	Ganho (%)
8	1,5380 \pm 0,4223	0,6857 \pm 0,0000	55,42
16	2,0172 \pm 0,5872	0,8533 \pm 0,0000	57,70
32	2,4851 \pm 0,3129	1,4759 \pm 0,0000	40,61
64	2,9898 \pm 0,2790	1,7897 \pm 0,0000	40,14
128	3,4995 \pm 0,2009	2,2431 \pm 0,0000	35,90
512	4,4916 \pm 0,1195	3,0452 \pm 0,0000	32,20
1024	5,0044 \pm 0,0818	3,5180 \pm 0,0000	29,70

Para $n = 1024$, o número médio de processos diminui de 413,36 para 86,00, correspondendo a um ganho de 79,19%.

De maneira consistente, a profundidade média necessária também é reduzida. Para sistemas menores ($n = 8$ e $n = 16$), o limiar é atingido ainda na raiz, resultando em profundidade igual a zero. Isso se dá pelo modelo de distribuição, que aloca 60% do impacto em apenas um processo. Para $n = 1024$, a profundidade média reduz-se de 5 para 3.

Esse comportamento confirma que, mesmo quando a concentração dos fatores de impacto já favorece parcialmente a estrutura original, a reorganização do Impact-VCube intensifica a concentração geométrica nas camadas próximas à raiz, reduzindo simultaneamente o esforço estrutural e a profundidade de estabilização.

Em comparação com a distribuição Zipf, os ganhos são ligeiramente menores para grandes valores de n , uma vez que a concentração inicial já reduz parcialmente a dispersão dos valores dos fatores de impacto.

Tabela 6. Eficiência até $Trust \geq 0,5$ — Distribuição Concentrada

n	Processos			Profundidade		
	VCube	Impact-VCube	Ganho (%)	VCube	Impact-VCube	Ganho (%)
8	3,85	1,00	74,03	1,57	0,00	100,00
16	6,94	1,00	85,59	2,03	0,00	100,00
32	13,49	3,00	77,76	2,48	1,00	59,68
64	26,48	6,00	77,34	2,96	1,00	66,22
128	56,95	11,00	80,69	3,38	2,00	40,83
512	239,76	43,00	82,06	4,50	2,00	55,56
1024	413,36	86,00	79,19	5,00	3,00	40,00

5.4. Ganho Estrutural Global

A Figura 2 compara o ganho percentual de Φ em função do tamanho do sistema para as três distribuições avaliadas. Observa-se que, para todas as distribuições, Φ cresce aproximadamente de forma linear em relação à dimensão do hiper-cubo $d = \log_2 n$. Esse comportamento é esperado, uma vez que a distância média entre processos e a raiz aumenta proporcionalmente à dimensão. Na distribuição aleatória, por exemplo, Φ cresce de 1,5034 (para $n = 8$) para 5,0005 (para $n = 1024$), seguindo aproximadamente a progressão de $\log_2 n$. Este resultado confirma a consistência geométrica do modelo experimental.

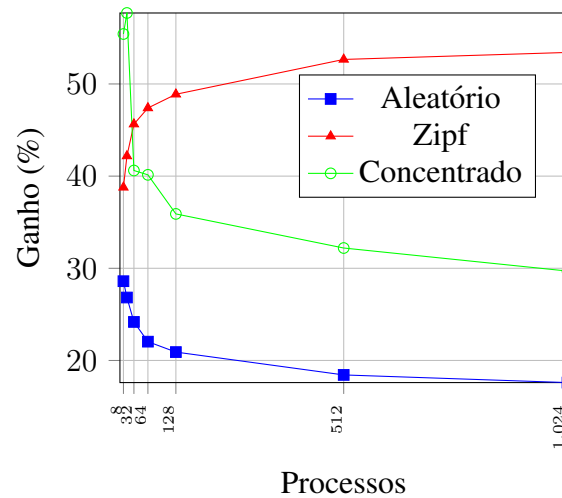


Figura 2. Ganho percentual de Φ em função do tamanho do sistema para todas as distribuições avaliadas.

Observa-se que o Impact-VCube reduz consistentemente o custo estrutural ponderado em todos os cenários analisados. De forma geral, os resultados evidenciam que:

1. O Impact-VCube nunca piora o custo estrutural em relação ao baseline aleatório;
2. O ganho relativo é diretamente proporcional ao grau de heterogeneidade da distribuição do fator de impacto;
3. Em distribuições altamente assimétricas, a redução de Φ pode ultrapassar 50%;
4. O benefício estrutural mantém-se estável e significativo quando aumenta a escala.

Como Φ aproxima o custo esperado de detecção ponderado por fator de impacto, os resultados fornecem evidência estrutural de que a adaptação topológica proposta reduz a latência ponderada esperada sem alterar a complexidade assintótica do VCube original.

Além disso, os resultados experimentais indicam forte correlação entre a redução de Φ e a diminuição da profundidade mínima necessária D_θ . Nos cenários com maior ganho estrutural, como na distribuição Zipf para $n = 1024$, a redução de Φ (53,42%) é acompanhada pela diminuição da profundidade média de 5 para 2 camadas.

6. Trabalhos Relacionados

Detectores de falhas não confiáveis foram formalizados por Chandra e Toueg (1996) como oráculos locais que complementam sistemas assíncronos. Posteriormente, outras classes fundamentais surgiram, como Ω e Σ [Chandra et al. 1996].

A maioria dos detectores tradicionais produz, como saída, o conjunto de processos suspeitos [Stein et al. 2023b, Stein et al. 2023a, Turchetti et al. 2016]. Mesmo detectores *accrual*, como o φ -failure detector [Hayashibara et al. 2004], fornecem métricas contínuas de suspeição, mas ainda associadas individualmente a cada processo. Em ambientes modernos, marcados por heterogeneidade, agrupamento de nós e tolerância a margens variáveis de falhas, essa visão binária ou individual torna-se limitada.

O VCube foi proposto como um algoritmo escalável de diagnóstico distribuído baseado na organização hierárquica do hipercubo [Duarte et al. 2023]. Sua principal

contribuição foi explorar propriedades logarítmicas da topologia para obter escalabilidade, reconfiguração dinâmica e balanceamento estrutural. A organização em clusters progressivos permite que o monitoramento se adapte após falhas, preservando conectividade e eficiência. Entretanto, o VCube original assume implicitamente que todos os processos possuem relevância equivalente, não diferenciando criticidade ou impacto sistêmico. Assim, embora a estrutura seja escalável, ela não é sensível à heterogeneidade funcional do sistema.

O *Impact Failure Detector* (ImpactFD) [Rossetto et al. 2018] introduziu um modelo no qual cada processo possui um fator de impacto, e a confiança no sistema é expressa por um *trust level* agregado. Um limiar configurável permite tolerar uma margem de falhas aceitável, ajustando o rigor do monitoramento. Entretanto, apesar de incorporar heterogeneidade, o ImpactFD opera sobre topologias fixas, não explorando reorganização estrutural baseada em criticidade.

Diversos trabalhos investigaram estratégias adaptativas para estimativa de chegada de *heartbeat*, visando equilibrar rapidez de detecção e redução de falsas suspeitas [Chen et al. 2002, Hayashibara et al. 2004]. Em ambientes de larga escala, detectores cooperativos também foram propostos. O Stab-FD [Sens et al. 2024] introduz um detector adaptativo e cooperativo para redes de longa distância, no qual processos compartilham informações sobre suspeitas e atrasos observados, permitindo estabilizar decisões em cenários com alta variabilidade de rede. Estas abordagens atuam na dimensão temporal, ajustando parâmetros de suspeita, mas não modificam a geometria da rede lógica. Assim, ainda que melhorem métricas de QoS, não reduzem a distância estrutural entre processos críticos e seus monitores.

7. Conclusão

Este trabalho apresentou o Impact-VCube, um mecanismo de reorganização adaptativa para o VCube que incorpora valores de impacto na estrutura lógica do detector. Demonstrou-se que a estratégia de pareamento entre processos ordenados por impacto e identificadores ordenados por proximidade à raiz minimiza o custo ϕ de obtenção do limiar de confiança do detector. A reorganização preserva a estrutura do VCube original e mantém complexidade assintótica $O(n \log n)$.

O resultados experimentais evidenciaram que a reorganização traduz em menor latência ponderada de detecção, redução do tempo até o sistema atingir o limiar de confiança e maior eficiência em cenários com alta heterogeneidade de fator de impacto. Os ganhos foram particularmente expressivos sob a distribuição Zipf, onde a concentração de impacto amplifica o benefício estrutural da reorganização. Importante destacar que a proposta não altera o mecanismo de diagnóstico do VCube, mas apenas sua organização lógica, mantendo suas propriedades de escalabilidade e tolerância a falhas.

Como trabalhos futuros, pretende-se investigar mecanismos distribuídos de reorganização incremental, analisar estabilidade sob variação temporal de impacto e validar a proposta em ambientes experimentais de larga escala. Pretende-se avaliar a adaptação dinâmica do fator de impacto baseado em métricas (mudança de latência, por exemplo) e reorganização da topologia.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com apoio da CAPES Código de Financiamento 001 e o Programa CAPES/STIC-AmSud, processo 88881.985518/2024-01 (projeto ITERATION-D).

Referências

- Chandra, T. D., Hadzilacos, V., and Toueg, S. (1996). The weakest failure detector for solving consensus. *Journal of the ACM*, 43(4):685–722.
- Chandra, T. D. and Toueg, S. (1996). Unreliable failure detectors for reliable distributed systems. *Journal of the ACM*, 43(2):225–267.
- Chen, W., Toueg, S., and Aguilera, M. K. (2002). On the quality of service of failure detectors. In *DSN*, pages 285–294.
- Duarte, E. P. and De Bona, L. E. (2002). A dependable snmp-based tool for distributed network management. In *IEEE/IFIP DSN*, pages 279–284. IEEE.
- Duarte, E. P., Rodrigues, L. A., Camargo, E. T., and Turchetti, R. C. (2023). The missing piece: a distributed system-level diagnosis model for the implementation of unreliable failure detectors. *Computing*, 105(12):2821–2845.
- Hayashibara, N., Défago, X., Yared, R., and Katayama, T. (2004). The ϕ accrual failure detector. In *Proc. 23rd IEEE SRDS*, pages 66–78. IEEE.
- Jeanneau, D., Rodrigues, L. A., Arantes, L., and Duarte Jr, E. P. (2017). An autonomic hierarchical reliable broadcast protocol for asynchronous distributed systems with failure detection. *Journal of the Brazilian Computer Society*, 23:1–14.
- Rodrigues, L. A., Arantes, L., and Duarte, E. P. (2016). An autonomic majority quorum system. In *2016 IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, pages 524–531. IEEE.
- Rodrigues, L. A., Duarte Jr, E. P., and Arantes, L. (2018). A distributed k-mutual exclusion algorithm based on autonomic spanning trees. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 115:41–55.
- Rossetto, A. G. d. M., Geyer, C. F. R., Arantes, L., and Sens, P. (2018). Impact fd: An unreliable failure detector based on process relevance and confidence in the system. *The Computer Journal*, 61(10):1557–1576.
- Sens, P., Arantes, L., Graciela De Moraes Rossetto, A., and Marin, O. (2024). Stab-fd: A cooperative and adaptive failure detector for wide area networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 186:104803.
- Steele, J. M. (2004). *The Cauchy-Schwarz Master Class: An Introduction to the Art of Mathematical Inequalities*. Cambridge Press, Cambridge.
- Stein, G., Rodrigues, L., and Jr., E. D. (2023a). Utilizando o vCube para detecção de falhas em sistemas assíncronos. In *WTF*, pages 29–42, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Stein, G., Rodrigues, L. A., Duarte Jr., E. P., and Arantes, L. (2023b). Diamond-p-vcube: An eventually perfect hierarchical failure detector for asynchronous distributed systems. In *LADC, LADC '23*, page 40–49, New York, NY, USA. ACM.
- Turchetti, R. C., Duarte, Jr, E. P., Arantes, L., and Sens, P. (2016). A QoS-configurable failure detection service for internet applications. *J. Internet Serv. Appl.*, 7(1).