

Estratégia de Agendamento de Purificação Híbrida para Redes Quânticas

David Tavares¹, Diego Abreu¹, Polyana Moraes¹, Arthur Pimentel¹, Antônio Abelém¹



UFPA
UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PARÁ



GERCOM UFPA
Grupo de Estudos em Redes de Computadores e
Comunicação Multimídia da Universidade Federal do Pará

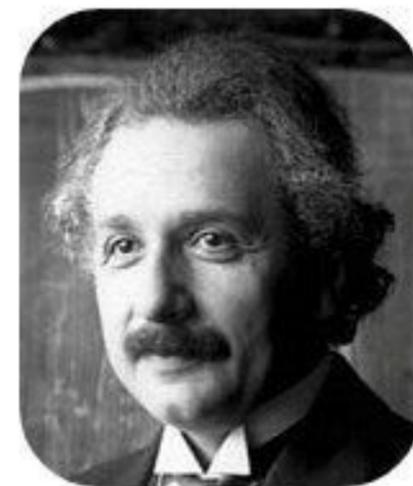


- 1. Introdução**
- 2. Objetivos**
- 3. Proposta**
- 4. Discussão e Resultados**
- 5. Considerações Finais**



INTRODUÇÃO: Entrelaçamento Quântico e Pares EPR

- Entrelaçamento Quântico
 - Fundamental para várias aplicações
- Pares EPR
- Importância para a Internet Quântica
 - Distribuição Quântica de Chaves via Entrelaçamento
 - Teletransporte Quântico
 - Computação Quântica Distribuída
 - Computação Quântica Cega.



A. Einstein



B. Podolsky



N. Rosen



Entrelaçamento Quântico



Introdução: Qualidade do Entrelaçamento

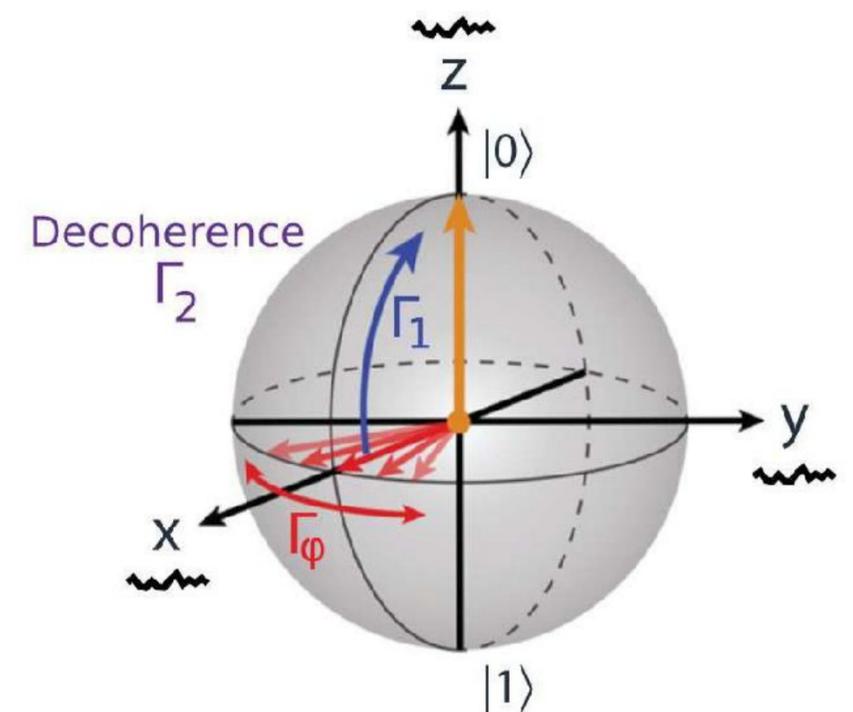
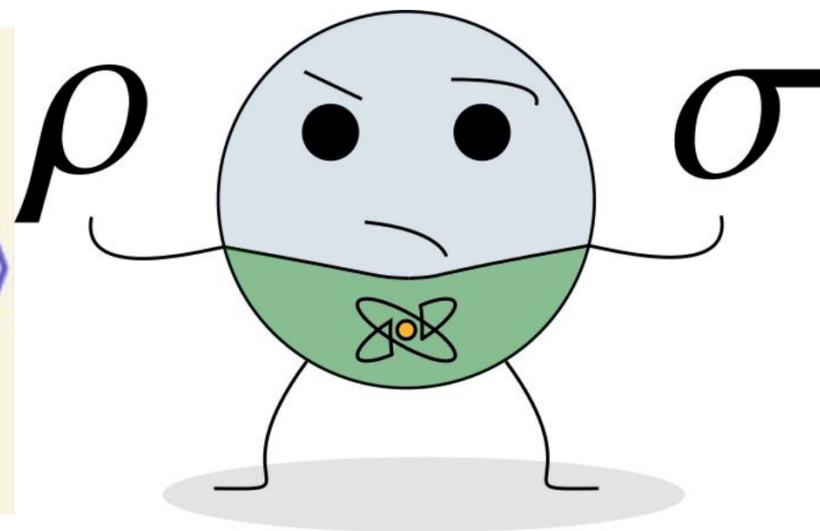
- Fidelidade
 - Principal métrica para redes de entrelaçamento
- Decoerência
 - Pares entrelaçados tem suas **fidelidades reduzidas** com o tempo, afetados por ruídos ou falhas de operação

desired output

$$F(\rho, |\psi\rangle) = \langle \psi | \rho | \psi \rangle$$

fidelity

actual output

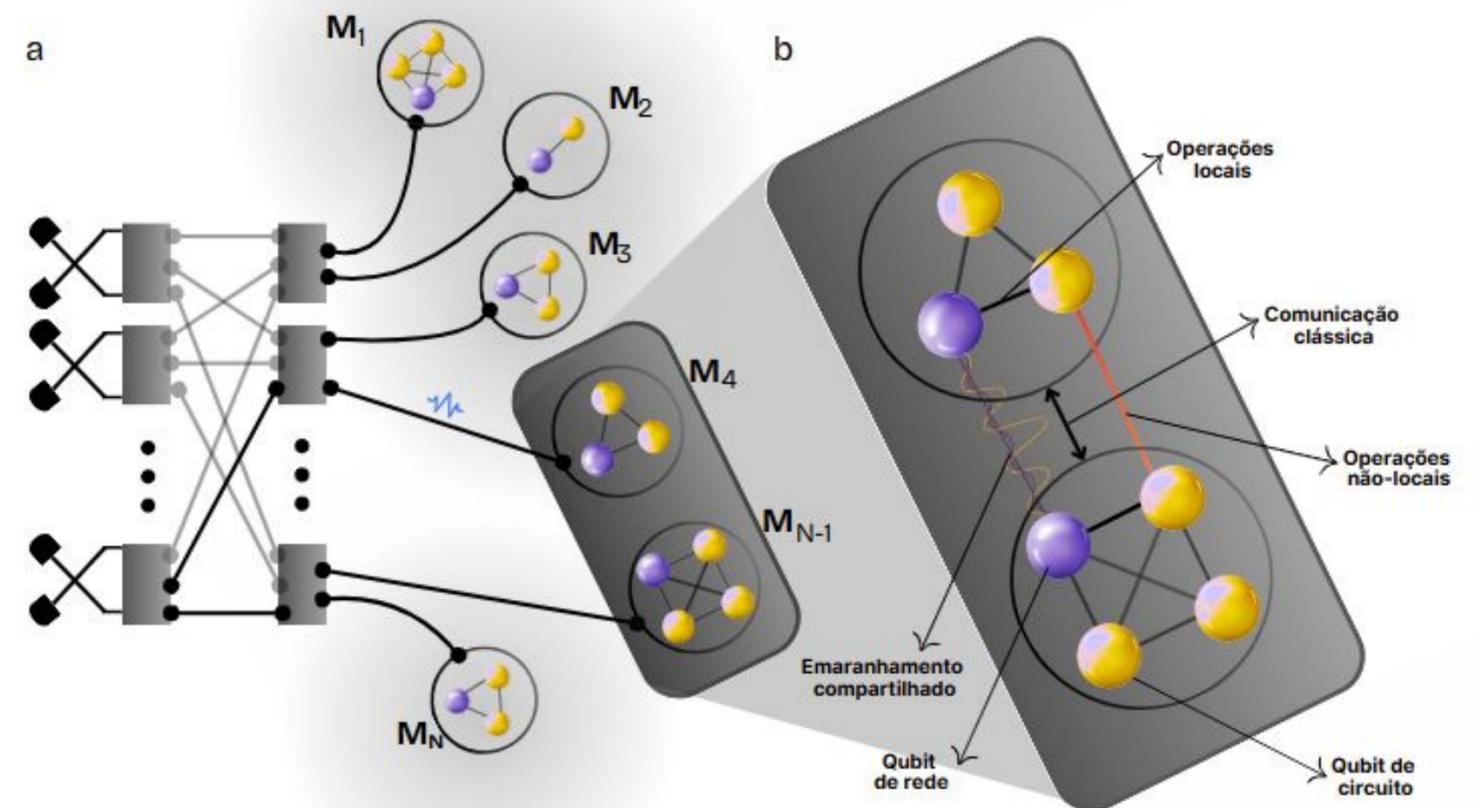
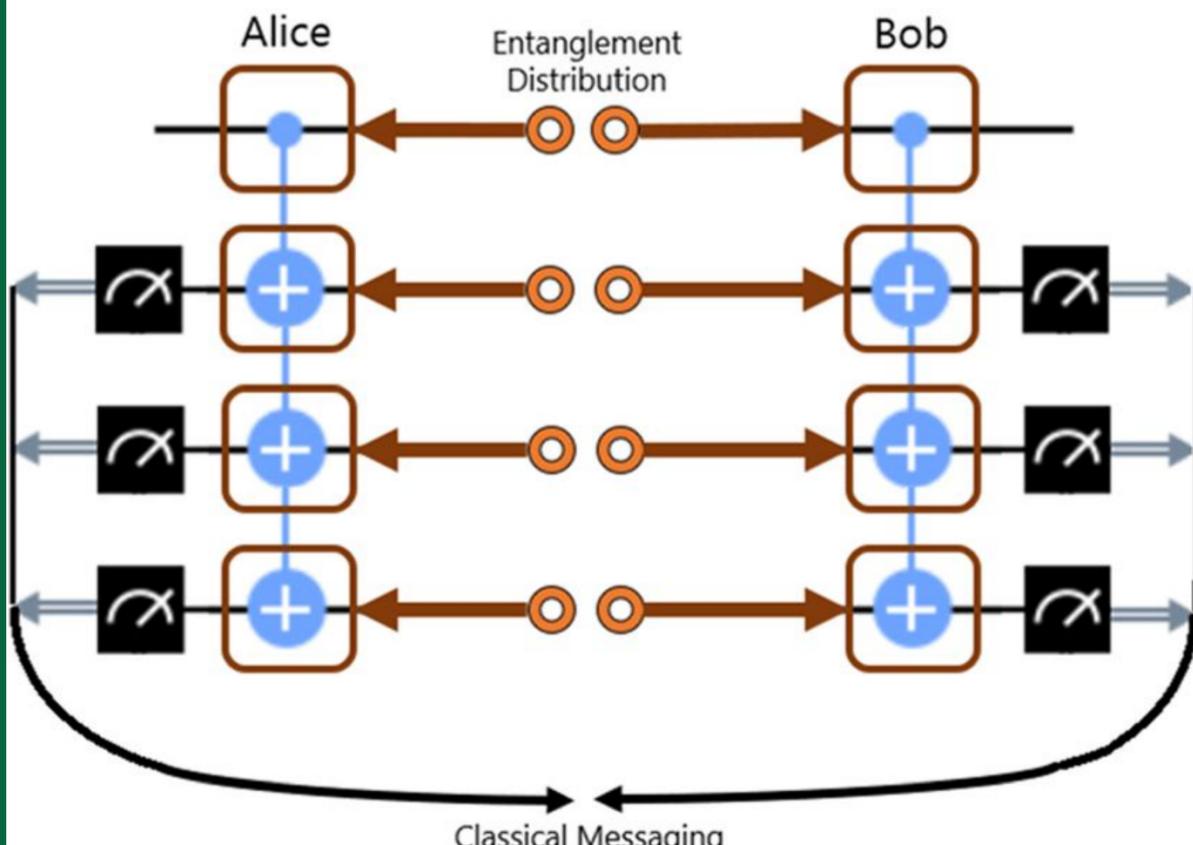




Contexto: Purificação (ou destilação)

- Objetivo:
 - Aumentar a Fidelidade dos Pares Entrelaçados
- Funcionamento
 - Utiliza 2 ou mais pares entrelaçados de fidelidade menor
 - Gera 1 par entrelaçado de maior fidelidade

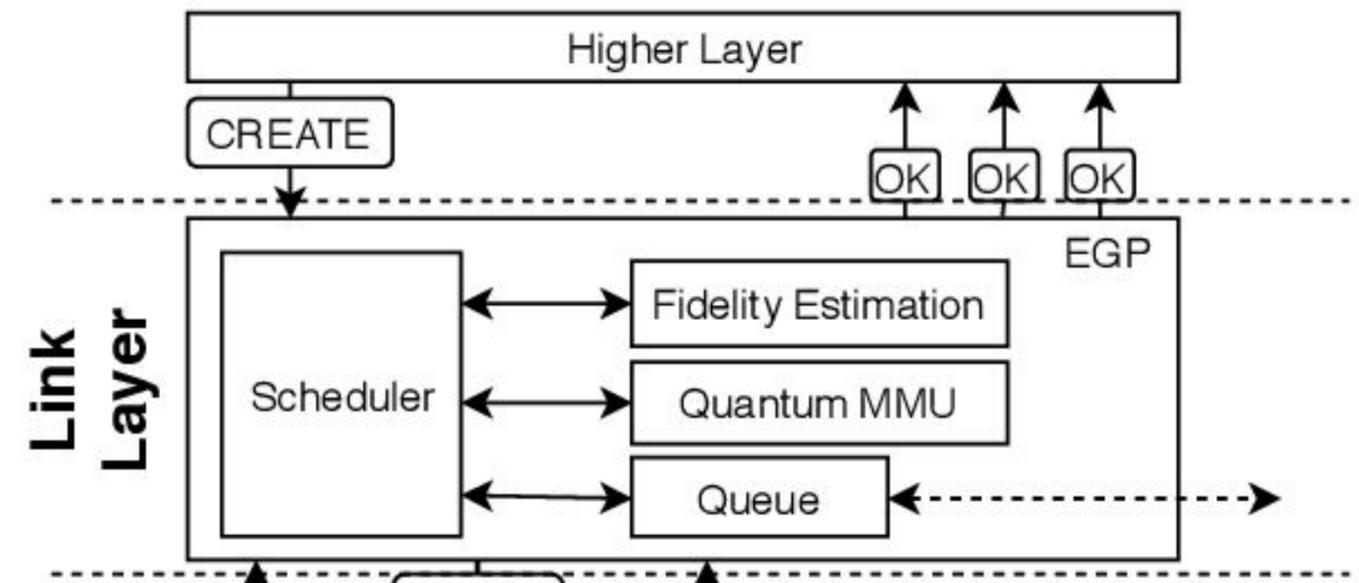
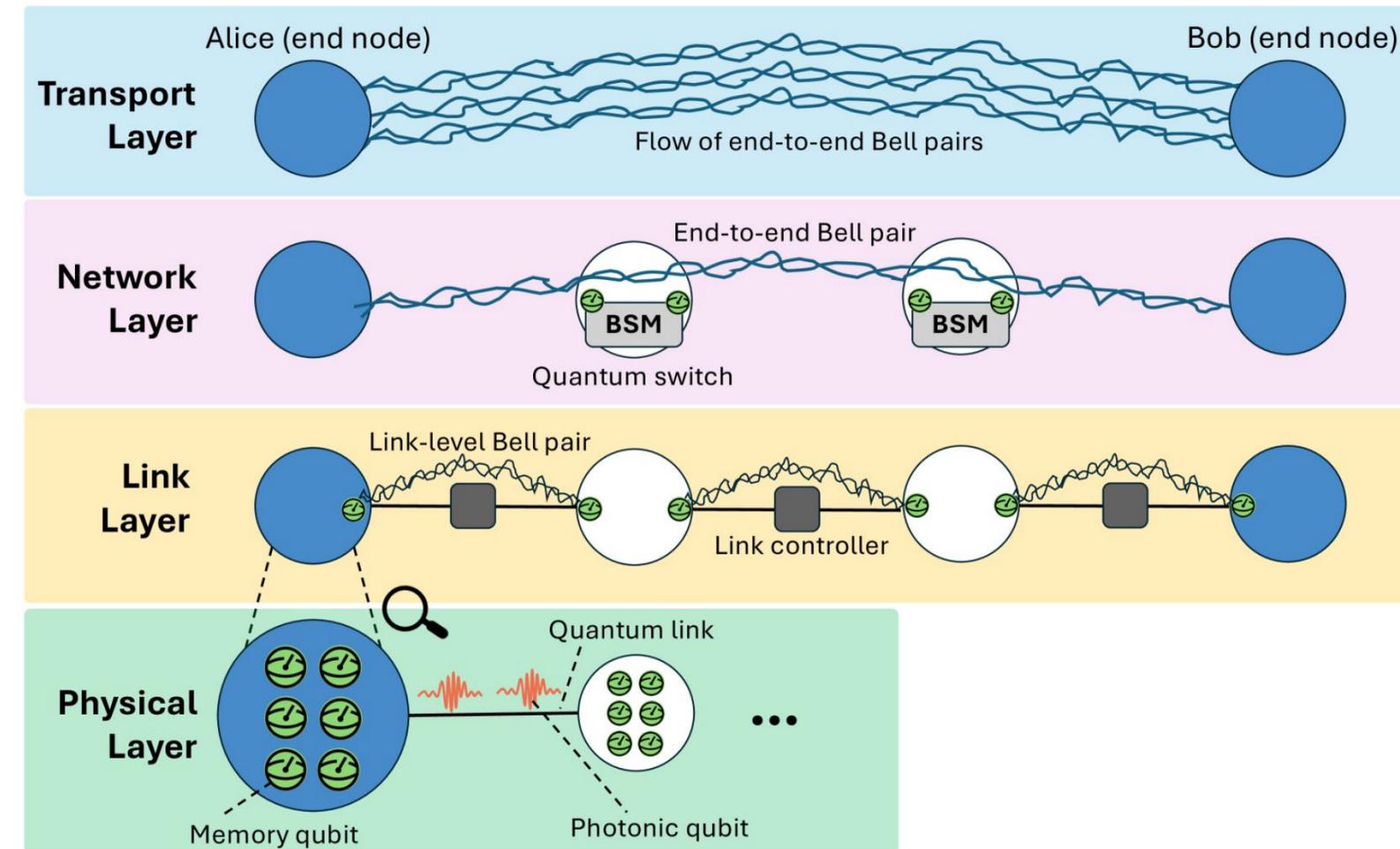
Multi-Qubit Entanglement Purification





Purificação: Visão Em Camadas

- Camada de Enlace Quântica (quantum link layer)
 - Responsável por
 - Realizar, Gerenciar, Sincronizar
 - Purificação entre nós diretamente conectados

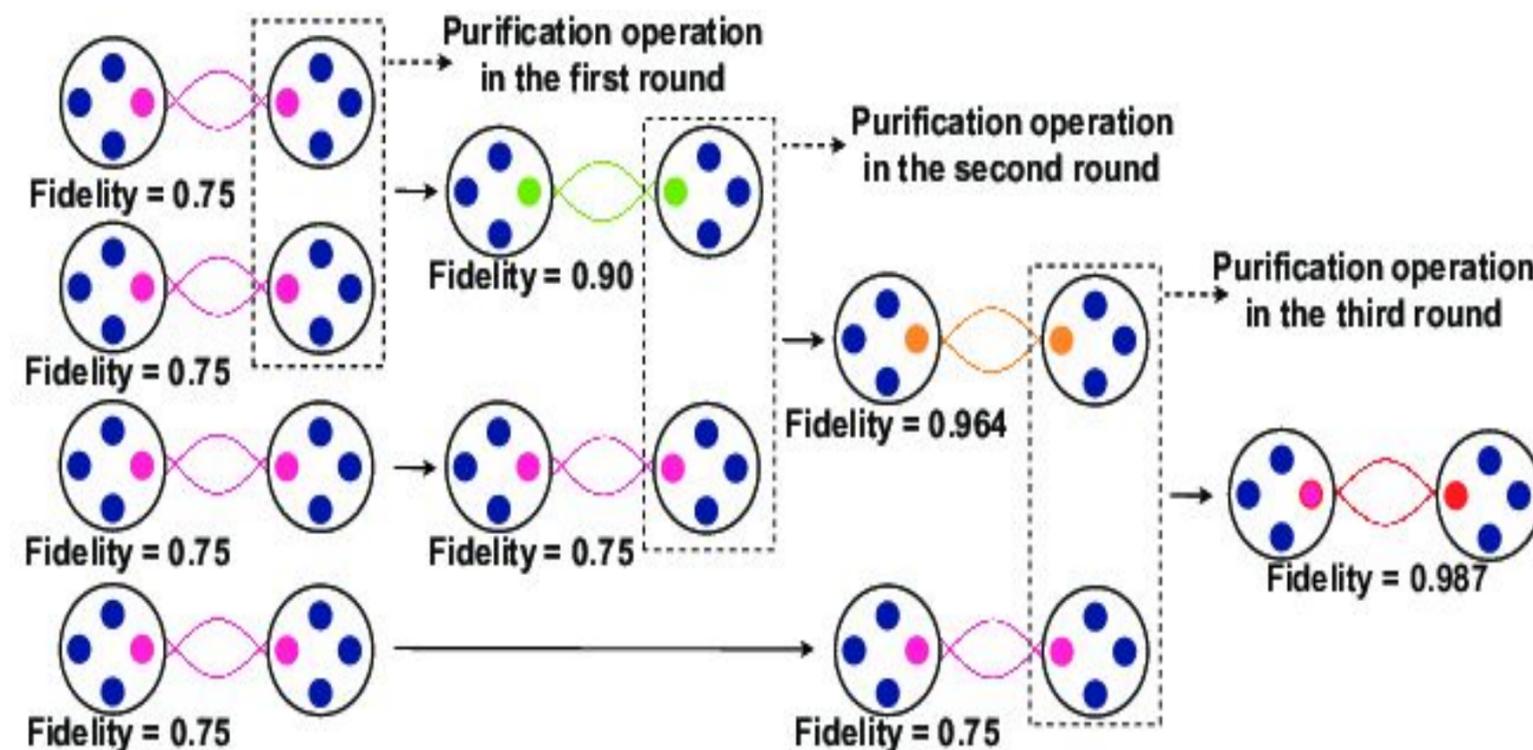




Purificação: Visão Em Camadas

7

- Purificação melhora fidelidade combinando pares EPRs
- Rodadas iterativas
 - Cada rodada são realizados processos de purificação
- Estão sujeitas a falhas.
 - Erros de canal afetam a eficácia da purificação.



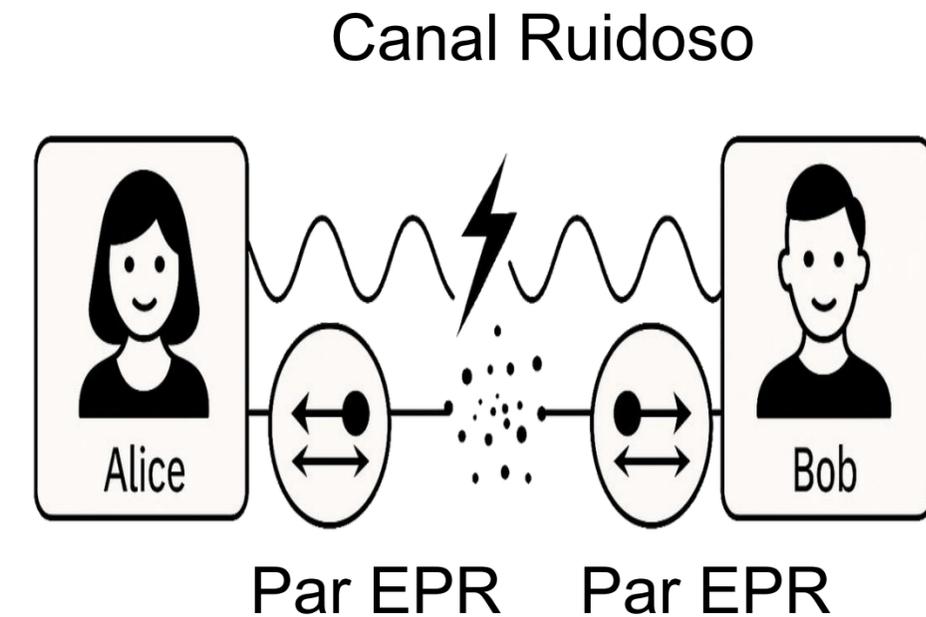
$$f_n = \frac{f_{n-1}^2 + \frac{1}{9}(1 - f_{n-1})^2}{f_{n-1}^2 + \frac{2}{3}f_{n-1}(1 - f_{n-1}) + \frac{5}{9}(1 - f_{n-1})^2}$$



Purificação: Desafios

3

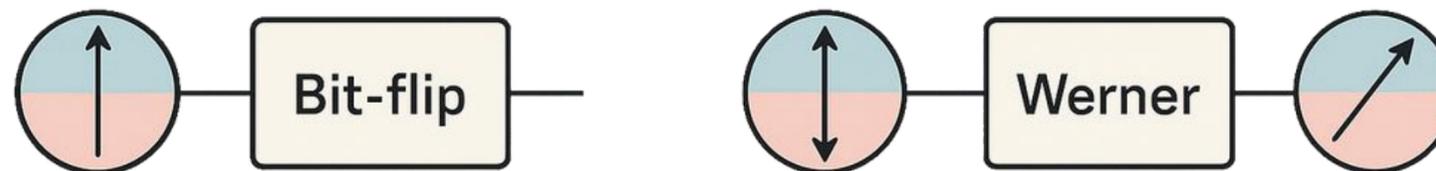
- Estratégias tradicionais de purificação enfrentam três desafios principais:
 - Estimativa incorreta do número de rodadas.
 - Baixa taxa de sucesso.
 - Desperdício de EPRs ociosos.





Purificação: Canais Ruidosos

- Impacto do Tipo de Canal:
 - Bit-flip
 - Werner
- Funcionamento Diferente!
 - Psucesso
 - Fidelidade Final



Canal Bit-flip

Entrada	Saída	Probabilidade	Resultado
$ \Phi^+\rangle_1 \Phi^+\rangle_2$	$ \Phi^+\rangle_1 \Phi^+\rangle_2$	F^2	Sucesso
$ \Phi^+\rangle_1 \Psi^+\rangle_2$	$ \Phi^+\rangle_1 \Psi^+\rangle_2$	$F(1 - F)$	Falha
$ \Psi^+\rangle_1 \Phi^+\rangle_2$	$ \Psi^+\rangle_1 \Psi^+\rangle_2$	$F(1 - F)$	Falha
$ \Psi^+\rangle_1 \Psi^+\rangle_2$	$ \Psi^+\rangle_1 \Phi^+\rangle_2$	$(1 - F)^2$	Sucesso

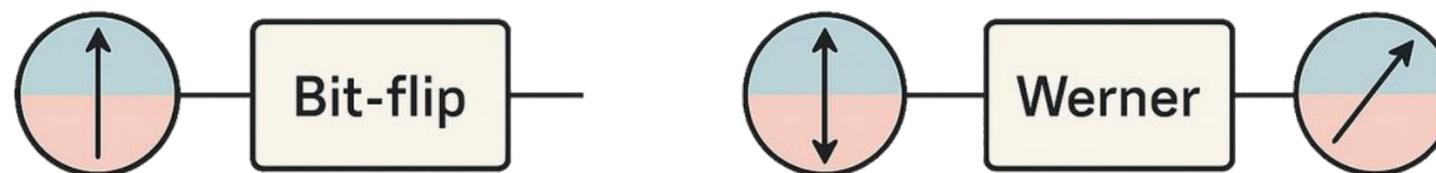
$$p_{\text{sucesso}} = F^2 + (1 - F)^2$$

$$F' = \frac{F^2}{F^2 + (1 - F)^2}$$



Purificação: Canais Ruidosos

- Impacto do Tipo de Canal:
 - Bit-flip
 - Werner
- Funcionamento Diferente!
 - P_{sucesso}
 - Fidelidade Final



Canal Werner

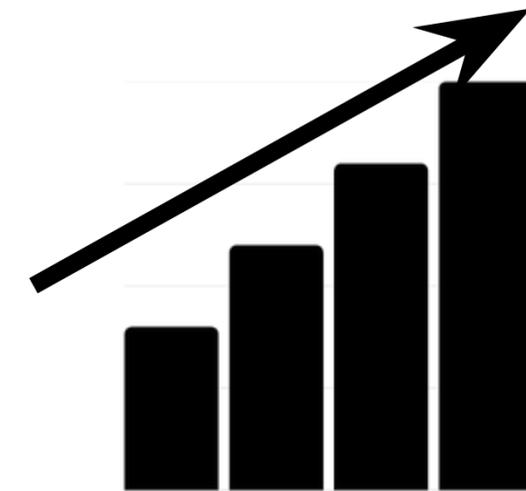
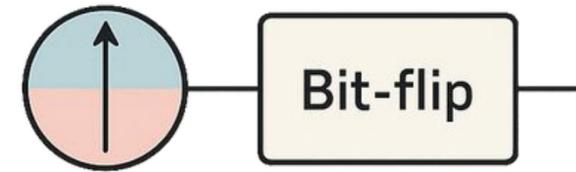
$$p_{\text{sucesso}} = \left(F + \frac{1 - F}{3} \right)^2 + \left(\frac{2(1 - F)}{3} \right)^2$$

$$F' = \frac{F^2 + \frac{1}{9}(1 - F)^2}{F^2 + \frac{2}{3}F(1 - F) + \frac{5}{9}(1 - F)^2}$$



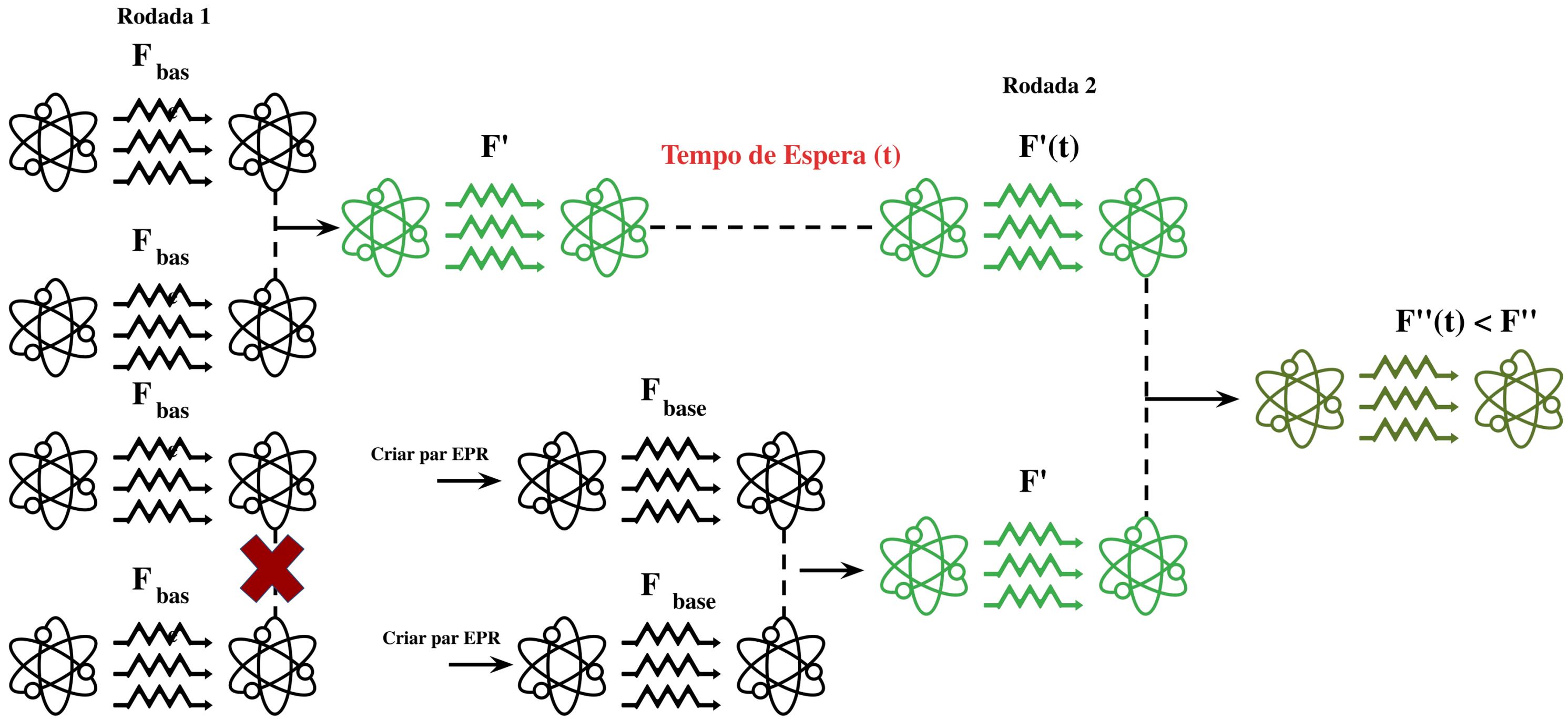
Purificação: Dimensionamento

- Consequências:
 - Subdimensionamento
 - Alocar menos EPRs do que o necessário
 - Não conseguir realizar a purificação
 - Sobredimensionamento
 - Alocar mais EPRs
 - Desperdício de recursos





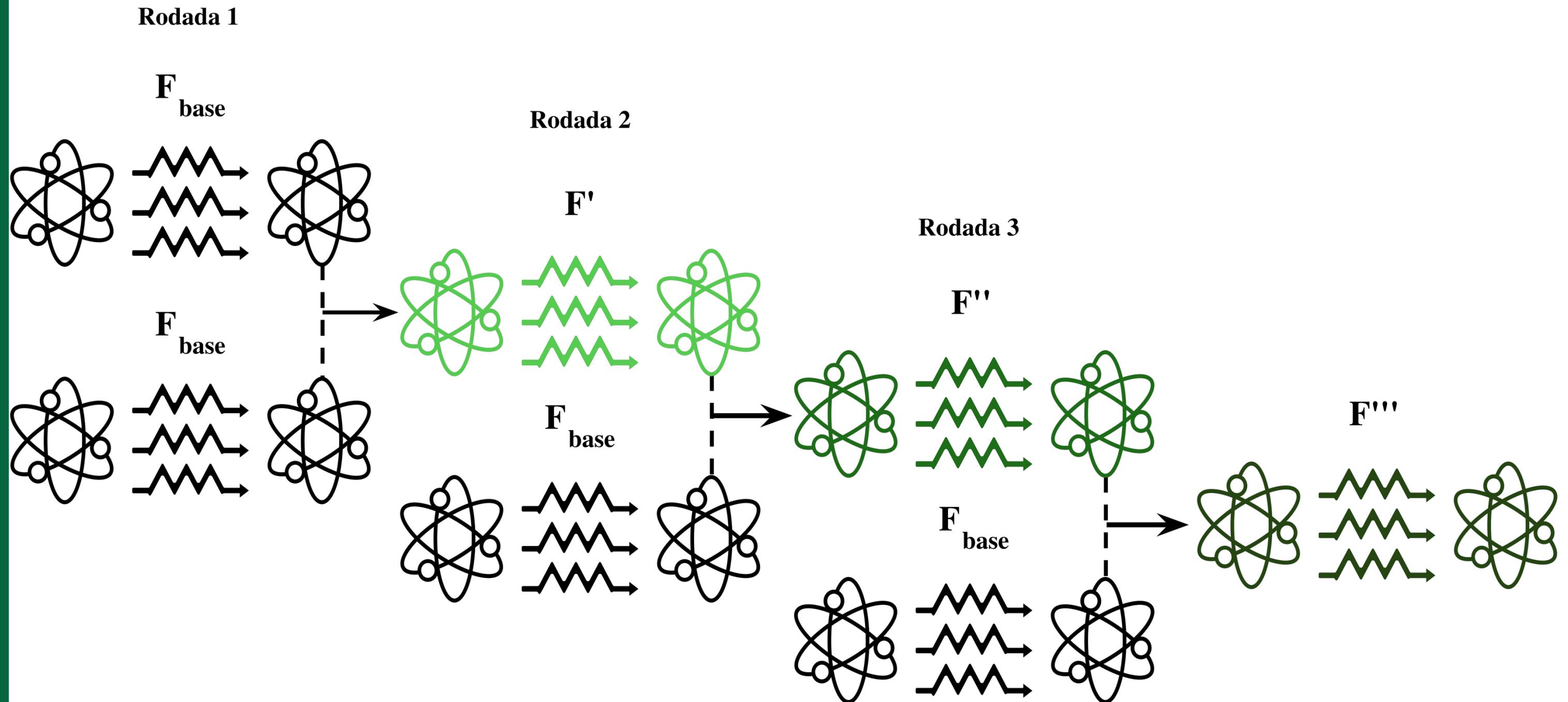
Estratégias de Agendamento de Purificação: Purificação Simétrica





Estratégias de Agendamento de Purificação: Purificação Pumping

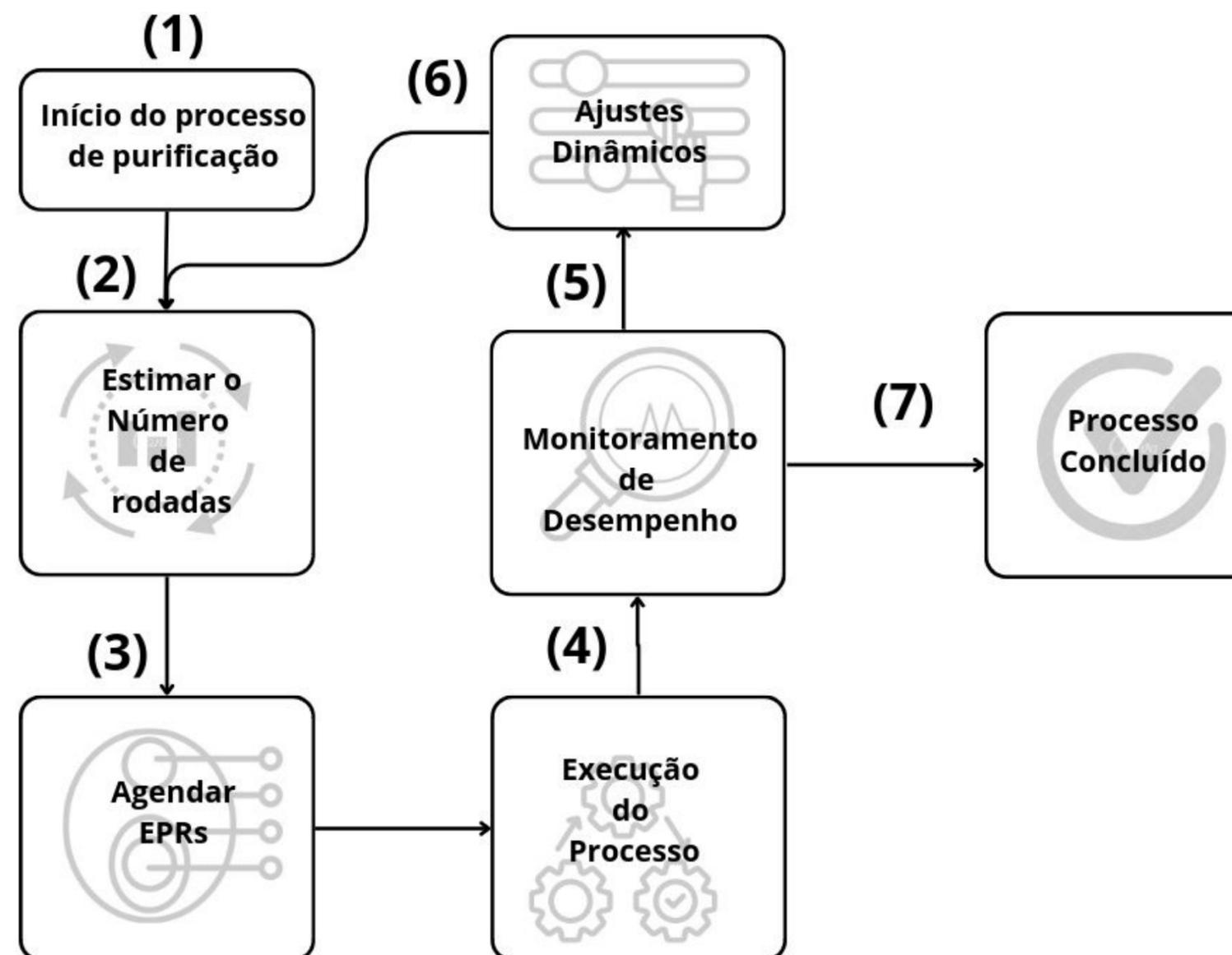
Estratégias de Agendamento





Proposta

- Estratégia híbrida de agendamento para purificação em redes quânticas heterogêneas.
- Ajuste dinâmico das rodadas e reaproveitamento de pares EPR ociosos
- Aumento de throughput e eficiência, mesmo sob ruídos bit-flip, Werner e misto.
- Reaproveitar pares não utilizados para novas tentativas, otimizando o uso de recursos.



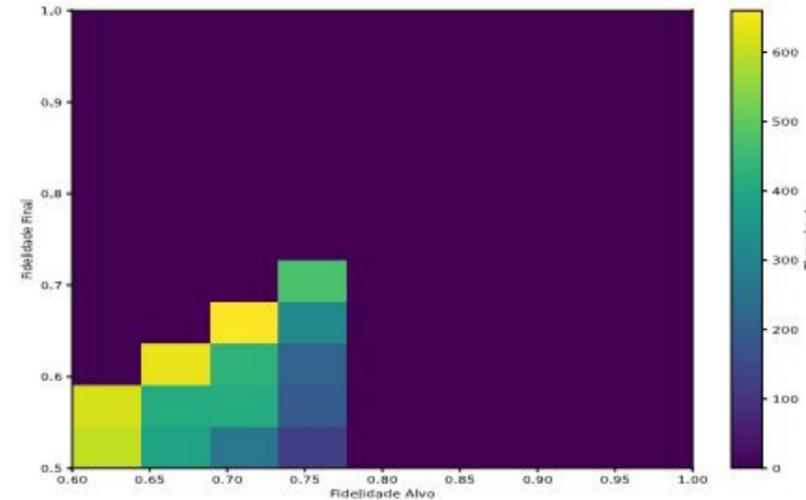


Discussão e Resultados

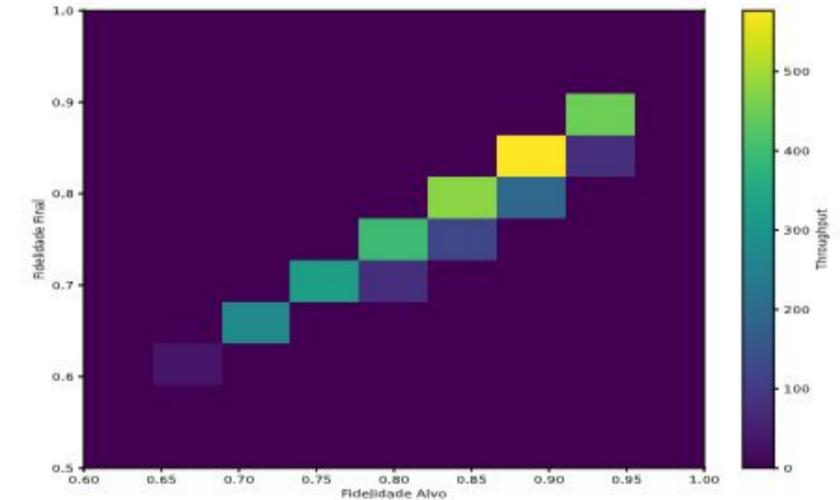
10

Cenário 1: Sobredimensionamento

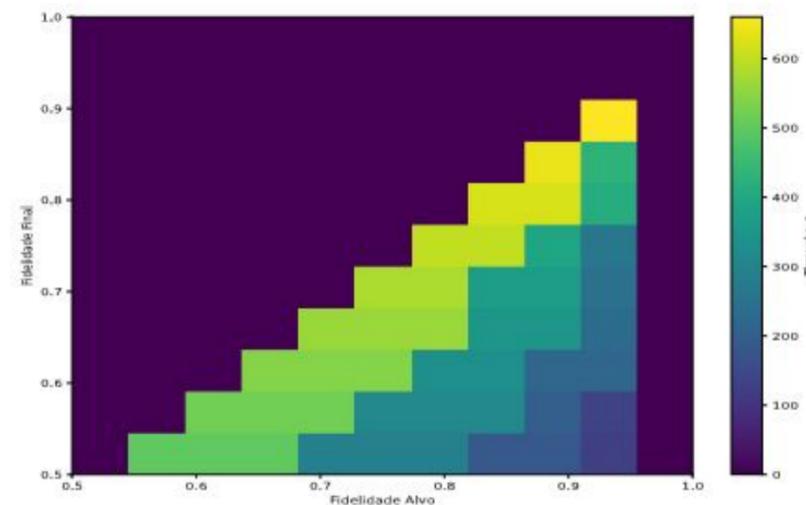
- Assume ruído mais severo (ex: canais Werner).
- Aloca rodadas de purificação em excesso.
- Causa desperdício de pares EPR não utilizados.
- Reduz a eficiência do sistema.



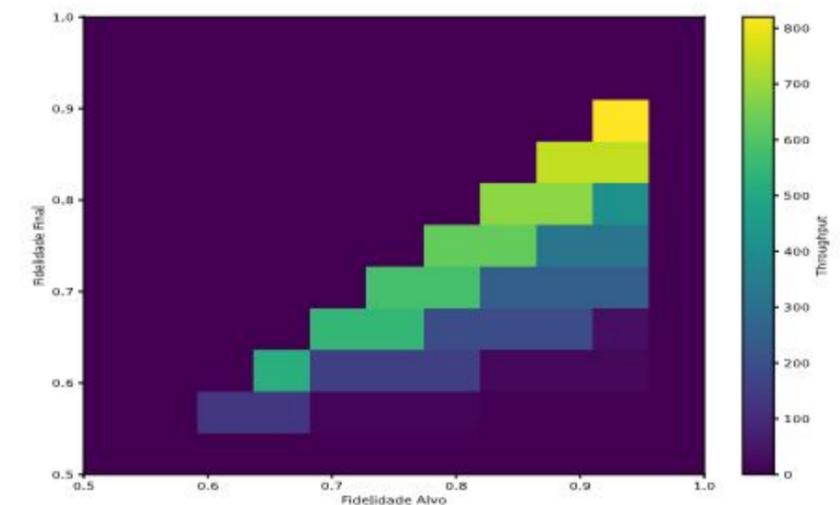
(a) *Pumping - Canal Werner.*



(b) *Simétrica - Canal Werner.*



(c) *Pumping - Canal bitflip.*



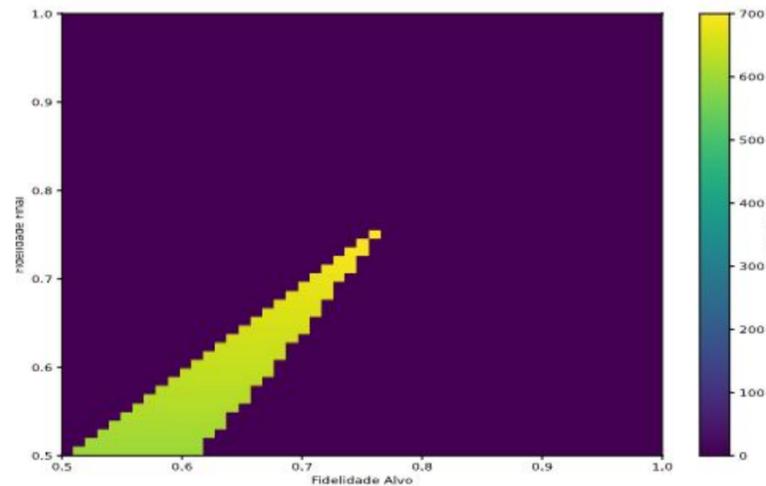
(d) *Simétrica - Canal bitflip.*



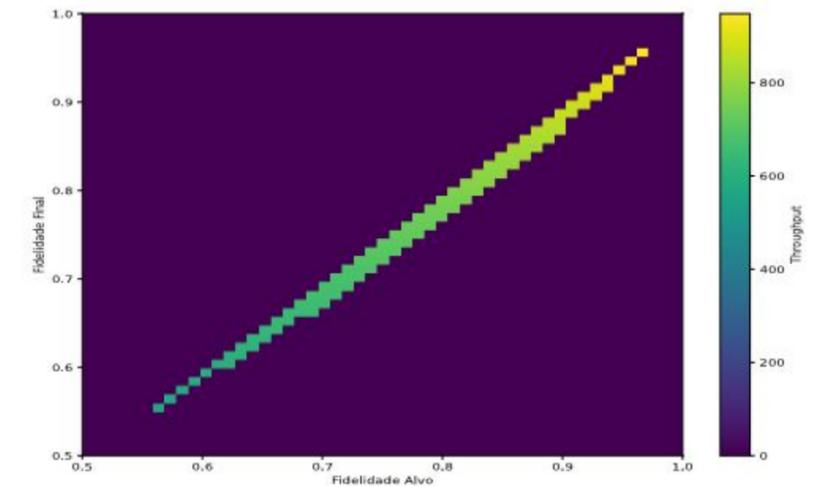
Discussão e Resultados

Cenário 2: Subdimensionamento

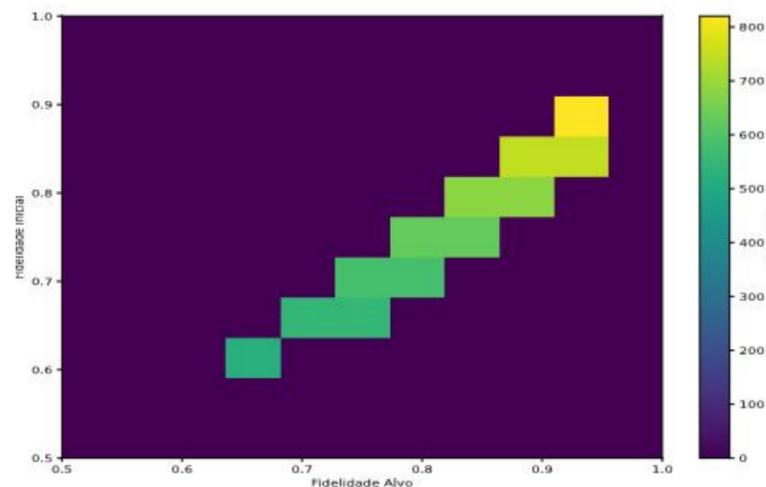
- Assume ruído mais leve (ex: apenas canais bit-flip).
- Aloca menos rodadas de purificação do que o necessário.
- Causa falhas no processo e perda de fidelidade.
- Impede a entrega de EPRs com qualidade suficiente.
- Diminui drasticamente o rendimento da rede.



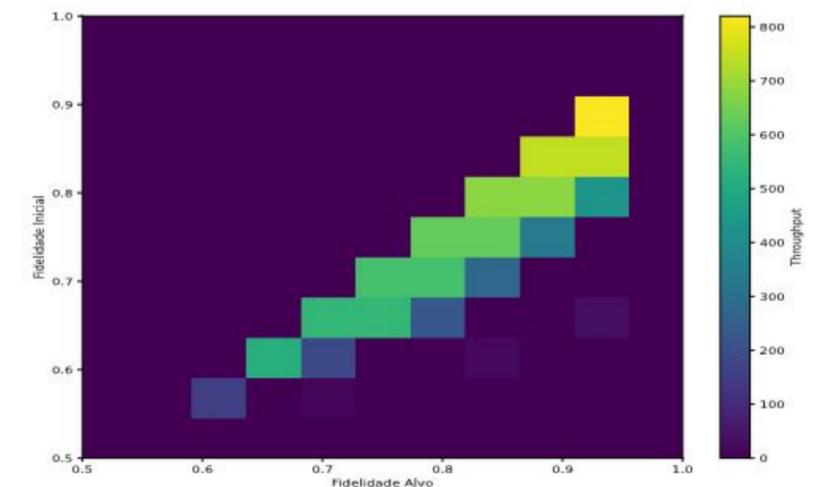
(a) *Pumping* - Canal Werner



(b) Simétrica - Canal Werner



(c) *Pumping* - Canal misto



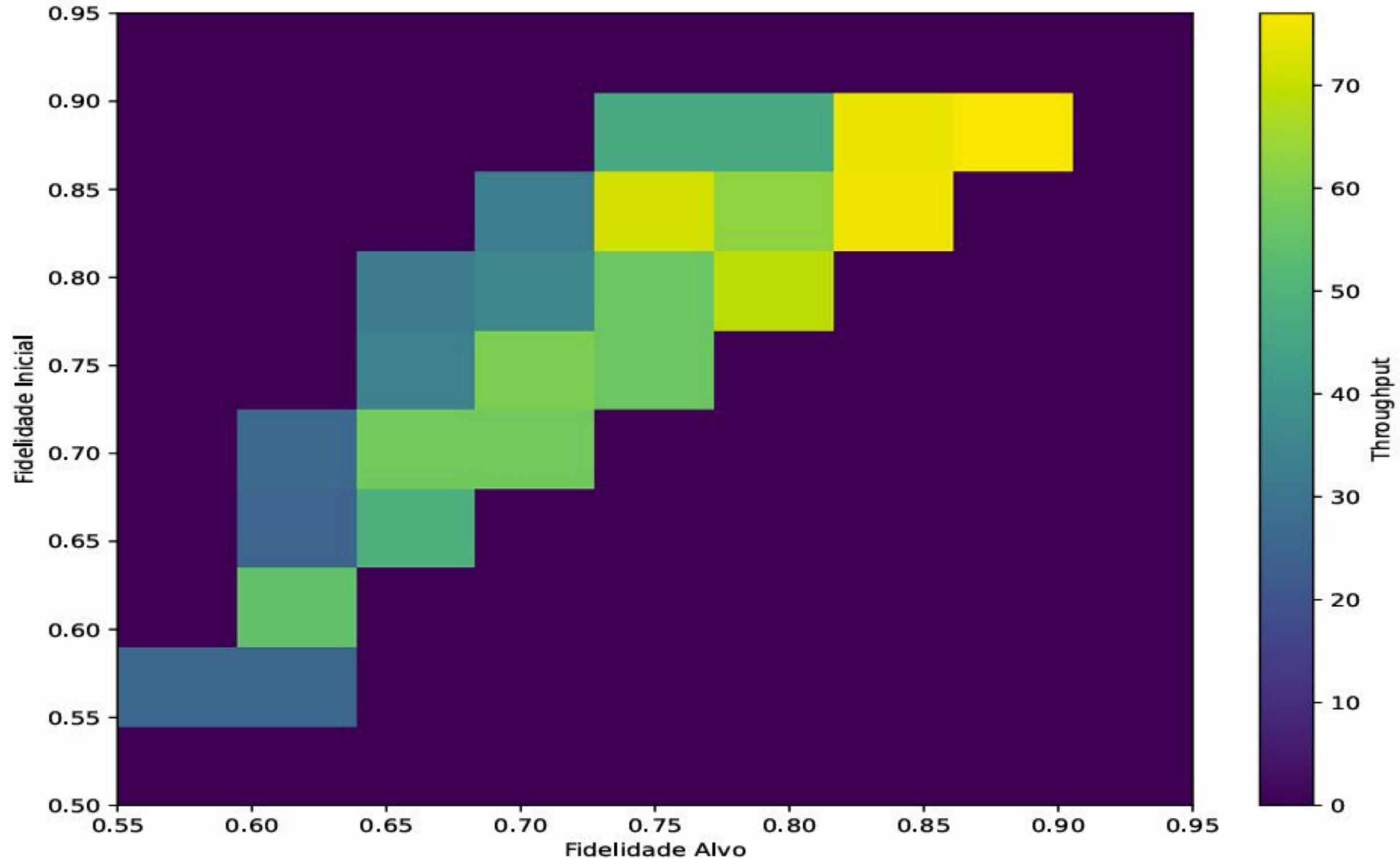
(d) Simétrica - Canal misto



Discussão e Resultados: Com a Proposta

12

Canal Bitflip
Estratégia Pumping

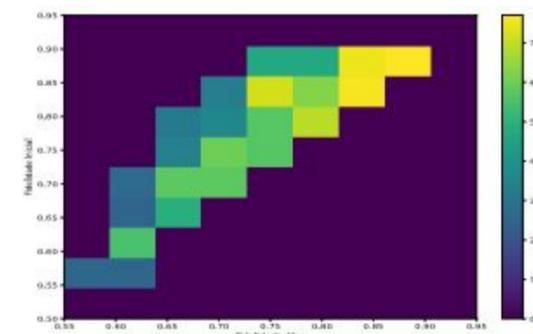




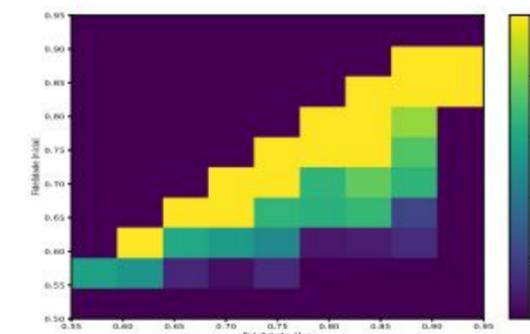
Discussão e Resultados

Cenário 3: Estratégia Híbrida Proposta

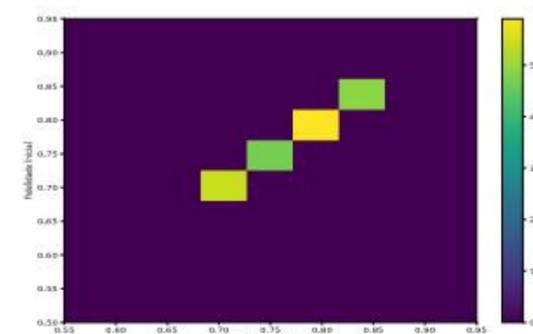
- Evita sub e sobredimensionamento, adaptando-se ao tipo de canal (bit-flip, Werner ou misto).
- Melhora o rendimento sem desperdício excessivo de recursos.
- Ideal para redes heterogêneas, com ruídos imprevisíveis e capacidade limitada.
- Equilíbrio entre eficiência de recursos e alta fidelidade.



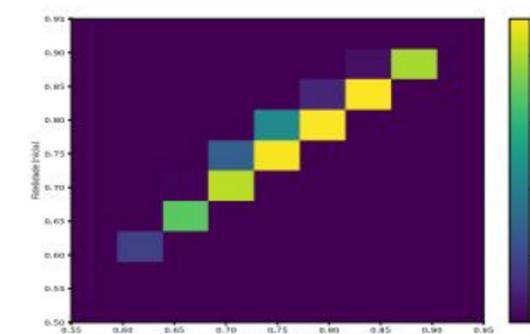
(a) Proposta com *pumping* - Canal *bitflip*.



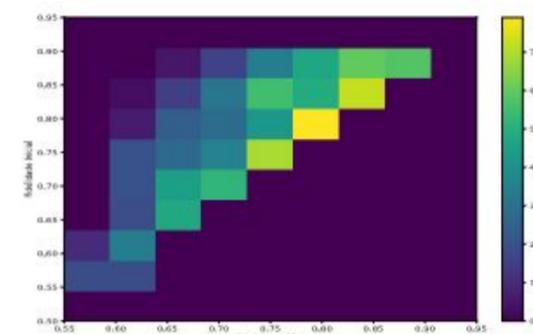
(b) Proposta com simétrica - Canal *bitflip*.



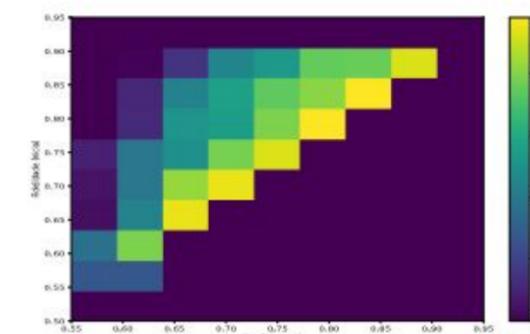
(c) Proposta com *pumping* - Canal *Werner*.



(d) Proposta com simétrica - Canal *Werner*.



(e) Proposta com *pumping* - Canal misto.



(f) Proposta com simétrica - Canal misto.



Conclusão e Trabalhos Futuros

13

- A estratégia híbrida se mostrou eficaz, adaptativa e eficiente.
- Supera limitações de métodos estáticos em redes quânticas reais.
- Reduz desperdício de recursos e melhora fidelidade dos EPRs entregues.
- Trabalhos Futuros
 - Integrar com a purificação após o processo de entanglement swapping
 - Estudar Técnicas de Otimização e/ou IA para ajudar na previsão
 - Considerar o tempo de disponibilidade do enlace



Artefatos

Código Disponível em



Estratégia de Agendamento de Purificação Híbrida para Redes Quânticas

David Tavares¹, Diego Abreu¹, Polyana Moraes¹, Arthur Pimentel¹, Antônio Abelém¹



UFPA
UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PARÁ



GERCOM UFPA

Grupo de Estudos em Redes de Computadores e
Comunicação Multimídia da Universidade Federal do Pará

