

COMUNICAÇÃO ORIENTADA A TAREFAS

MINICURSO - SBRT 2025

EDUARDO NUNES VELLOSO

JOSÉ CÂNDIDO SILVEIRA SANTOS FILHO

ISAAC ANDRÉS BALBUCA GUACHIZACA

PAULO CARDIERI

FEEC - UNICAMP

1/10/25

CONTEÚDO

Parte I: Técnicas de transmissão orientada a tarefas

Parte II: Limites de compressão orientada a tarefas

PARTE I:

TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO

ORIENTADA A TAREFAS

Alta demanda por serviços de comunicação sem fio
Urgência por sistemas eficientes no uso de energia
Espectro limitado e já congestionado

Busca por novas estratégias de comunicação

Shannon e Weaver já haviam vislumbrado outros problemas da comunicação, além do técnico.

- ▶ Todo processo de comunicação tem um objetivo.

Tirar o foco no problema técnico e colocar no objetivo da comunicação pode levar ao uso mais eficiente dos recursos

1. Cenário atual
2. Age of Information
3. Controle de acesso ao meio dependente de AoI
4. Version Innovation Age
5. Monitoramento de processos usando VIA
6. Idade da Informação Incorreta
7. Comunicação ciente da semântica para rastreamento de processos
8. Valor da Informação

CENÁRIO ATUAL

Aumento das aplicações baseadas em redes sem fio.

Necessidade de sistemas de comunicação mais eficientes no uso de energia.

Aplicações que exigem transmissões com alta confiabilidade e baixos atrasos – requerem muito recurso.

As estratégias de comunicação atuais:

- São indiferentes quanto ao conteúdo das mensagens.

- Otimizam vazão de dados, atraso e perda de pacotes.

Garantir vazão/atraso/confiabilidade não é o que se deve buscar em muitas aplicações atuais.

Considere o caso de comunicação entre veículos para a tomada de decisão para evitar uma colisão¹

O cumprimento da tarefa não está associado à maximização da vazão ou minimização do atraso.

“... é crucial considerar no processo de comunicação a **urgência** e o **valor das mensagens** fornecidas por cada sensor...”

¹Marios Kountouris e Nikolaos Pappas, “Semantics-Empowered Communication for Networked Intelligent Systems,” IEEE Communications Magazine, June 2021.

NOVA FORMA DE VER OS SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO

O processo de comunicação deixa de ser visto como um fim e passa a ser visto como **um meio para se atingir um objetivo**.

O elemento central passa a ser o **significado e a importância** da mensagem no cumprimento do objetivo da comunicação.

Necessidade de novas estratégias de projeto e otimização de sistemas de comunicação.

OS NÍVEIS DE COMUNICAÇÃO

- **Nível Técnico:** Trata da precisão na transmissão dos símbolos da mensagem.
- **Nível Semântico:** Refere-se à precisão na transmissão do significado da informação transportada pela mensagem.
- **Nível da Efetividade:** Trata da eficácia da transmissão da mensagem no processo de mudança de comportamento do destino.

¹W. Weaver, "Recent contributions to the mathematical theory of communication," ETC: a review of general semantics, pp. 261-281, 1953.

OS PROBLEMAS DA COMUNICAÇÃO

Domínios linguísticos	Sistemas de comunicação	Shannon–Weaver
Pragmática	Comunicação semântica e orientada a objetivo	Problema da efetividade
Semântica		Problema semântico
Sintaxe	Controle de erro, protocolo	Problema técnico
Morfologia	Símbolos compostos	
Fonologia	Símbolos da camada física	

¹Figura baseada em D. Gündüz, F. Chiariotti, K. Huang, A. E. Kalør, S. Kobus and P. Popovski, “Timely and Massive Communication in 6G: Pragmatics, Learning, and Inference,” in IEEE BITS the Information Theory Magazine, vol. 3, no. 1, pp. 27-40, March 2023.

PROBLEMA DE EFETIVIDADE

Nível da Efetividade: Trata da eficácia da transmissão da mensagem no processo de mudança de comportamento do destino.

A formulação de um problema de comunicação sob o ponto de vista da efetividade requer uma forma de medir o efeito das ações tomadas. ²

Uma forma de modelar o problema é por meio de Processo de Decisão de Markov.

² D. Gündüz, F. Chiariotti, K. Huang, A. E. Kalør, S. Kobus and P. Popovski, "Timely and Massive Communication in 6G: Pragmatics, Learning, and Inference," in IEEE BITS the Information Theory Magazine, vol. 3, no. 1, pp. 27-40, March 2023.

COMUNICAÇÃO ORIENTADA A TAREFAS

A semântica da mensagem pode ser extraída (e medida) sob o ponto de vista de uma tarefa específica.

⇒ Comunicação orientada a tarefas

O processo de transmissão da informação é orientada para se cumprir uma tarefa ou atingir um objetivo específico.

Amostragem dos sinais/processos,

Etapas da comunicação: p.ex., controle de acesso ao meio, alocação de recursos, etc.

Pergunta central: Como medir a informação de uma mensagem?

Métricas usuais do desempenho de um sistema de comunicação:

- Taxa de erro de bits

- Atraso

- Eficiência espectral e energética

Essas medidas são indiferentes quanto à tarefa associada à tarefa/objetivo.

Precisamos de métricas que retratem o quão bem uma tarefa está sendo executada:

- Idade da Informação (*Age of Information* - AoI)

- Valor da Informação (*Value of Information* - Vol)

AGE OF INFORMATION

Baseada no artigo

S. Kaul, R. Yates and M. Gruteser, "Real-time status: How often should one update?," 2012, IEEE INFOCOM, 2012, pp. 2731-2735.

AGE OF INFORMATION

Considere um sistema em que pacotes são gerados nos instantes S_i e entregues ao destino nos instantes D_i .

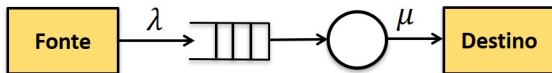
No instante t , o pacote mais fresco disponível no destino é aquele que chegou no instante $U(t) = \max\{S_i | D_i \leq t\}$

A *Age of Information* medida no destino é, portanto,

$$\Delta(t) = t - U(t)$$

MODELO DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ATUALIZAÇÕES

Considere o sistema:



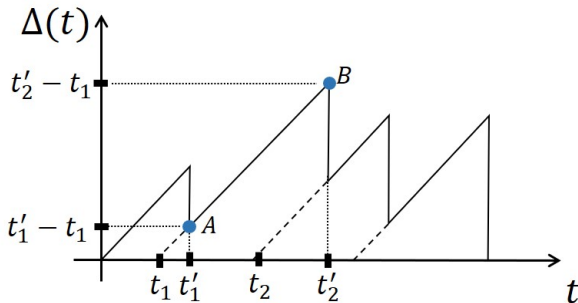
- ▶ A fonte gera pacotes (atualizações) a uma taxa λ .
- ▶ A transmissão de um pacotes toma um tempo, aleatório ou fixo, com duração média $1/\mu$.
- ▶ Pacotes aguardam pela transmissão em uma fila.

AGE OF INFORMATION (AoI)

Função AoI $\Delta(t)$:

- indica a idade da última atualização recebida no destino e
- cresce linearmente com o tempo.

t_i : geração do pacote t'_i : chegada do pacote.



AGE OF INFORMATION (AoI)

Valor médio de $\Delta(t)$

$$\Delta = \lim_{\mathcal{T} \rightarrow \infty} \underbrace{\frac{1}{\mathcal{T}} \int_0^{\mathcal{T}} \Delta(t) dt}_{\Delta_{\mathcal{T}}}.$$

Podemos mostrar que

$$\Delta = \lambda \left(E[XT] + \frac{E[X^2]}{2} \right)$$

X é intervalo entre chegadas,

T é o tempo gasto pelo pacote no sistema (tempo na fila + tempo no servidor).

Se X é pequeno, T será grande $\rightarrow X$ e T são correlacionados

AOI MÉDIO EM FILAS M/M/1

Fila M/M/1

- ▶ Processo de chegada: Poisson, intervalo entre chegadas tem distribuição exponencial, taxa λ
- ▶ Processo de serviço: duração tem distribuição exponencial, taxa μ
- ▶ taxa de utilização $\rho = \lambda/\mu$, $\mu > \lambda$

AOI médio em M/M/1:

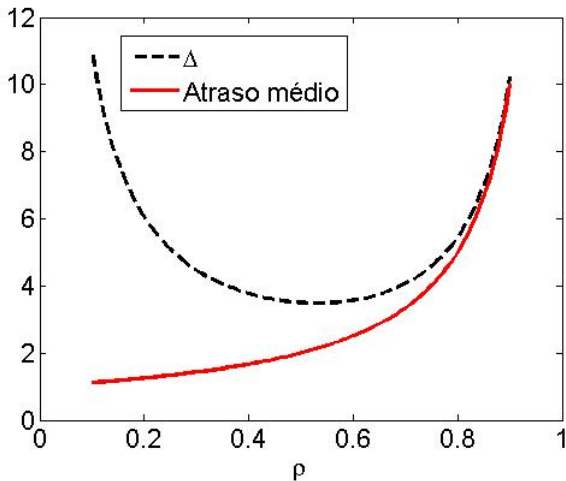
$$\Delta_{M/M/1} = \frac{1}{\mu} \left(1 + \frac{1}{\rho} + \frac{\rho^2}{1 - \rho} \right)$$

Tempo médio no sistema:

$$E[T] = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

AOI MÉDIO EM FILAS M/M/1

Para $\mu = 1$



CONTROLE DE ACESSO AO MEIO DE- PENDENTE DE AOI

Baseada no artigo

H. Chen, Y. Gu and S. -C. Liew, "Age-of-Information Dependent Random Access for Massive IoT Networks," IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Toronto, ON, Canada, 2020, pp. 930-935

N dispositivos reportando a um ponto de acesso (AP) o estado de um processo.

Canal único, Slotted Aloha.

A cada time-slot (TS): dispositivo está ativo ou inativo com uma certa probabilidade.

Se ativo: amostra o estado do processador no início do TS (*generate-at-will*) e transmite naquele TS.

Modelo de canal de colisão: Transmissão é bem sucedida se apenas um dispositivo transmite.

$\Delta_i(t)$: AoI instantâneo do i -ésimo dispositivo no TS t .

$$\Delta_i(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{se apenas dispositivo } i \text{ transmite} \\ \Delta_i(t) + 1, & \text{caso contrário} \end{cases}.$$

AoI médio:

$$\bar{\Delta}_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \Delta_i(t).$$

Protocolo *Age-Dependent Random Access* (ADRA)

Ideia geral: Se AoI é baixo $\Rightarrow$ baixa probabilidade de acesso: aumenta a chance de sucesso de transmissão de dispositivos com alto AoI

p_l = Probabilidade de o i -ésimo dispositivo tornar-se ativo (e acessar o canal) quando $\Delta_i(t) = l$

Cada dispositivo: $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots\}$

THRESHOLD-BASED ADRA

Threshold-based ADRA:

Se $\Delta_i(t) < \delta$: dispositivo é **inativo** – probabilidade de ativação é 0.

Se $\Delta_i(t) \geq \delta$: dispositivo é **ativo** com probabilidade p

Exemplo: $\delta = 3$: $\mathbf{p} = \{0, 0, p, p, \dots\}$

CONTROLE DE ACESSO **INDEPENDENTE** DO Aol

Quando o acesso ao canal é feito de forma **independente** do valor do Aol e com a mesma probabilidade p' :

- Probabilidade de transmissão bem sucedida: $q = (1 - p')^{N-1}$
- Aol médio:

$$\bar{\Delta}_i = \frac{1}{p' (1 - p')^{N-1}}$$

Para o caso ADRA:

Probabilidade de sucesso q de cada dispositivo depende do Aol dos **outros** dispositivos.

O Aol de cada dispositivo depende das probabilidades q dos **outros** dispositivos

Portanto: as evoluções de $\Delta_i(t)$ são **acopladas** – análise difícil.

Hipótese: assumir que a probabilidade q é constante para todos os terminais, quando eles decidem transmitir – isso desacopla os processos.

Porém, q será ainda dependente de p e do limiar δ

Lembrando: vetor $\mathbf{p} = \{0, 0, p, p, \dots\}$

Com essa aproximação, o comportamento de $\Delta_i(t)$ de cada dispositivo pode ser modelado pela seguinte Cadeia de Markov Discreta no Tempo:

- ▶ Se $\Delta_i(t) < \delta$: prob. de ativação é 0.
- ▶ pq : probabilidade de sucesso: faz $\Delta_i(t)$ ir para $\Delta_i(t) = 1$
- ▶ $1 - pq$: probabilidade de falha na transmissão: $\Delta_i(t)$ aumenta.

MODELAGEM DA EVOLUÇÃO DE $\Delta_i(t)$

DTMC: modela o comportamento de $\Delta_i(t)$

Infinitos estados: $S_l \in \{1, 2, \dots\}$, $l \in \{1, 2, \dots\}$

Probabilidades $T_{m,n}$: transição do estado m para estado nr :

$$\begin{cases} T_{l,l+1} = 1, & l \in \{1, 2, \dots, \delta - 1\} \text{ (Inativo)}, \\ T_{l,l+1} = 1 - pq, & l \in \{\delta, \delta + 1, \dots\}, \text{ (Ativo sem sucesso)} . \\ T_{l,1} = pq, & l \in \{\delta, \delta + 1, \dots\} \text{ (Ativo com sucesso)}. \end{cases}$$

A DTMC tem solução (isto é, tem prob. de estado estacionária)

$$\pi_l = \begin{cases} \frac{pq}{\delta pq + 1 - pq}, & l \in \{1, 2, \dots, \delta\} \\ \frac{pq(1 - pq)^{l-\delta}}{\delta pq + 1 - pq}, & l \in \{\delta + 1, \delta + 2, \dots\} \end{cases}.$$

Parâmetros:

- ▶ p : Conhecido (escolhido)
- ▶ δ : Conhecido (escolhido)
- ▶ q : **Desconhecido**: determinado por solução numérica.

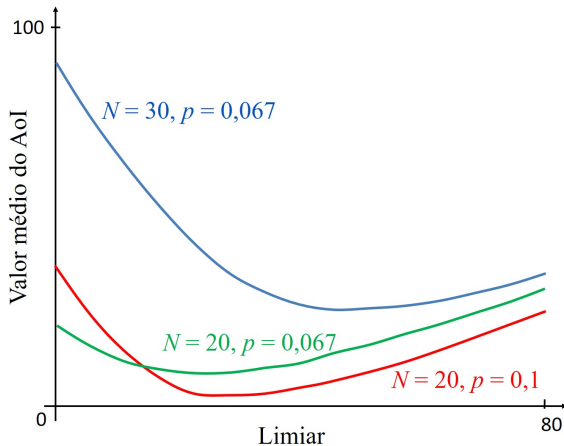
AJUSTE DO VALOR DO LIMIAR δ

Existe um valor de δ que minimiza o Aol médio: depende de N e de p

Se δ aumenta:

- Diminui a probabilidade de o dispositivo estar ativo
- Diminui chance de colisão

AJUSTE DO VALOR DO LIMIAR δ

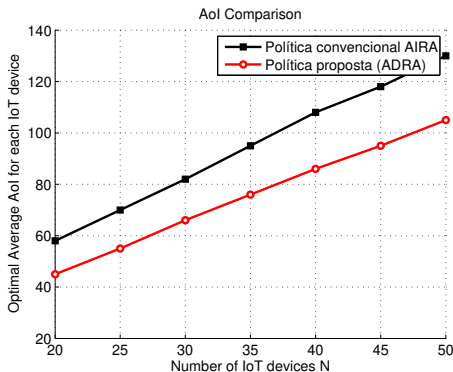


3

³Figura baseada em H. Chen, Y. Gu and S. -C. Liew, "Age-of-Information Dependent Random Access for Massive IoT Networks," IEEE INFOCOM 2020, Toronto, ON, Canada, 2020, pp. 930-935

COMPARAÇÃO

- AIRA: $p = 1/N$, independente de $\Delta_i(t)$
- ADRA: Valor de δ otimizado



VERSION INNOVATION AGE

A métrica Version Innovation Age (VIA)⁵ mede quantas versões de informação no receptor estão desatualizadas em relação ao estado real da fonte.

Quantifica, em cada slot, quantas “inovações de versão” do estado da fonte ainda não chegaram ao receptor

A VIA não “dá crédito” à sincronização acidental de valores se não houve entrega bem-sucedida.

⁵M. Salimnejad, M. Kountouris, A. Ephremides, and N. Pappas, “Age of Information Versions: a Semantic View of Markov Source Monitoring,” arXiv preprint arXiv: 2406.14594, 2024.

Aol vs. VIA — DIFERENÇAS ESSENCIAIS

Critério	Aol	VIA
O que mede	Tempo desde o último update recebido.	Número de inovações de estado ainda não entregues ao receptor (condicionado ao estado da fonte)
Evolução sem entrega	Cresce a cada slot (envelhece com o tempo)	Só cresce quando há mudança de estado e a entrega falha; em estagnação, permanece
Com entrega bem-sucedida	Reinicia	Vai a zero se a fonte não mudou no slot; vai a um se houve mudança exatamente no slot da entrega

AoI vs. VIA — DIFERENÇAS ESSENCIAIS

Critério	AoI	VIA
Sensibilidade principal	Tempo	Eventos/mudanças (ignora tempo parado sem inovação)
Implicações p/ decisão	Incentiva tráfego para manter frescor temporal	Economiza energia em estagnação da fonte e reage a mudanças não reportadas

MONITORAMENTO DE PROCESSO COM RESTRIÇÃO DE ENERGIA USANDO VIA

MONITORAMENTO DE PROCESSO COM RESTRIÇÃO DE ENERGIA

Baseado no artigo:

M. Salimnejad, A. Ephremides, M. Kountouris and N. Pappas, “Optimizing Version Innovation Age for Monitoring Markovian Source in Energy-Harvesting Systems,” 2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference.

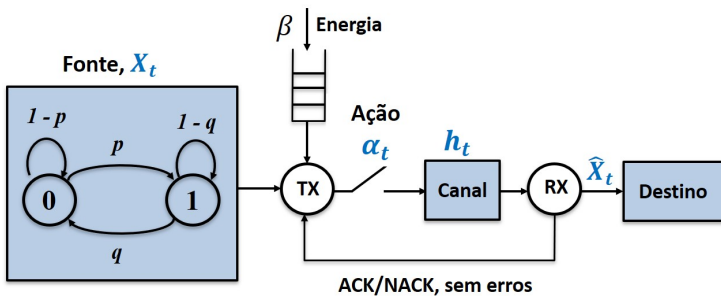
MONITORAMENTO DE PROCESSO COM RESTRIÇÃO DE ENERGIA

Problema: monitoramento em tempo real de uma fonte Markoviana (2 estados) por sensor com *energy harvesting*.

Métrica: *Version Innovation Age*

Abordagem: formulação via Markov Decision Process de horizonte infinito (custo médio) para minimizar VIA médio.

MONITORAMENTO DE PROCESSO COM RESTRIÇÃO DE ENERGIA



Bateria finita, chegada aleatória de pacotes de energia.
Cada transmissão consome 1 unidade de energia.

Evolução de VIA Δ_{t+1}

$$\Delta_{t+1} = \begin{cases} \Delta_t, & X_{t+1} = X_t \text{ \& } (\alpha_t = 0 \text{ ou } (\alpha_t = 1, h_t = 0)), \\ \min\{\Delta_t + 1, \Delta_{\max}\}, & X_{t+1} \neq X_t \text{ \& } (\alpha_t = 0 \text{ ou } (\alpha_t = 1, h_t = 0)), \\ 1, & X_{t+1} \neq X_t, \alpha_t = 1, h_t = 1, \\ 0, & X_{t+1} = X_t, \alpha_t = 1, h_t = 1. \end{cases}$$

MDP (horizonte infinito, custo médio):

Estado: $S_t = (e_t, X_t, \Delta_t)$ (bateria, estado da fonte, VIA).

Ação: $\alpha_t \in \{0,1\}$ (transmitir/não transmitir).

Custo instantâneo: $C(S_t, \alpha_t) = \Delta_t$.

A política ótima é *threshold-based* em e, X, Δ :

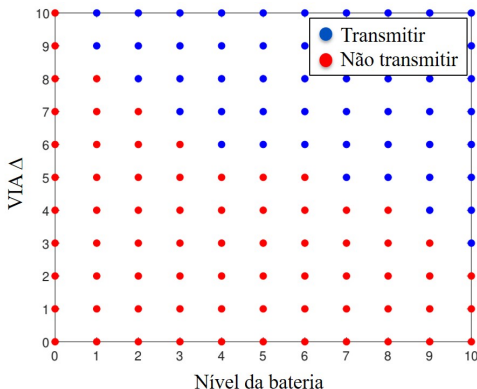
- ▶ Se $e = 0$ ou $\Delta = 0$, não transmite
- ▶ Caso contrário, compara Δ a limiares dependentes de e e do estado X .

Comparação

- ▶ MDP, VIA
- ▶ Greedy: sempre transmite atualizações quando a bateria não está vazia
- ▶ Random: transmite atualizações com probabilidade 0.5 quando a bateria não está vazia

MONITORAMENTO DE PROCESSO COM RESTRIÇÃO DE ENERGIA

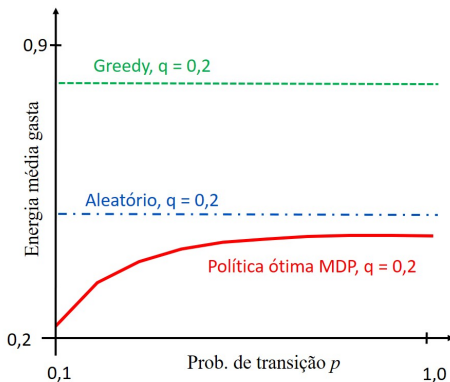
Política ótima⁶



⁶ Figura baseada em M. Salimnejad, A. Ephremides, M. Kountouris and N. Pappas, "Optimizing Version Innovation Age for Monitoring Markovian Source in Energy-Harvesting Systems," 2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference.

MONITORAMENTO DE PROCESSO COM RESTRIÇÃO DE ENERGIA

Gasto de energia⁷



⁷ Figura baseada em M. Salimnejad, A. Ephremides, M. Kountouris and N. Pappas, "Optimizing Version Innovation Age for Monitoring Markovian Source in Energy-Harvesting Systems," 2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference.

Achados:

Política ótima **supera** políticas de referência (randômica estacionária e *greedy*), sobretudo com pouca energia.

VIA média cresce com processos que mudam mais rápido (valores altos de p/q).

Conclusões:

VIA é métrica semântica adequada a monitoramento orientado a tarefa (prioriza mudanças relevantes).

Política ótima simples (limiares) e implementável; orienta quando gastar energia.

IDADE DA INFORMAÇÃO INCORRETA

IDADE DA INFORMAÇÃO INCORRETA (AoII)

A AoII⁸ quantifica o quão errado está o estado reconstruído (no receptor) e por quanto tempo ele permanece errado.

Diferente da AoI (que mede apenas “idade” do último pacote), a AoII combina magnitude do erro com duração do erro.

⁸A. Maatouk, S. Kriouile, M. Assaad and A. Ephremides, "The Age of Incorrect Information: A New Performance Metric for Status Updates," in IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 28, no. 5, pp. 2215-2228, Oct. 2020.

IDADE DA INFORMAÇÃO INCORRETA (AoiI)

Forma geral:

$$\Delta_{AoiI}(t) = f(t) \times g(X(t), \hat{X}(t))$$

$f(t)$: função crescente da penalidade paga pelo destino por não estar ciente do estado correto na fonte.

$g(t)$: alguma medida da diferença entre o processo na fonte e no destino

Permite **funções de penalidade não lineares** ajustadas à tarefa.

COMPARAÇÃO Aol vs. Aoll

Aspecto	Aol	Aoll
O que mede	Tempo desde o último update recebido (defasagem temporal).	Quanto tempo o monitor permanece incorreto multiplicado por quão incorreto está.
Evolução sem mudança de estado	Cresce continuamente, mesmo que $\hat{X}(t) = X(t)$.	Permanece em 0 (não há penalidade se a estimativa está correta).
Mudança de estado sem update	Continua crescendo do mesmo modo.	Passa a crescer (inicia em 1) e aumenta com o tempo enquanto $\hat{X}(t) \neq X(t)$.

COMPARAÇÃO Aol vs. Aoll

Aspecto	Aol	Aoll
Atualização correta recebida	Reinicia (tipicamente zero).	Zera a penalidade e reinicia a contagem do tempo correto.
Sensibilidade principal	Apenas ao tempo (frescor).	Tempo $\times$ erro (combina duração do erro e magnitude/tolerância via g).
Penalização por permanência no erro	Não distingue; sempre penaliza o envelhecimento, mesmo correto.	Penalização crescente enquanto o monitor estiver errado.

COMUNICAÇÃO ORIENTADA A TAREFAS PARA MONITORAMENTO DE PROCES- SOS

Baseada no artigo

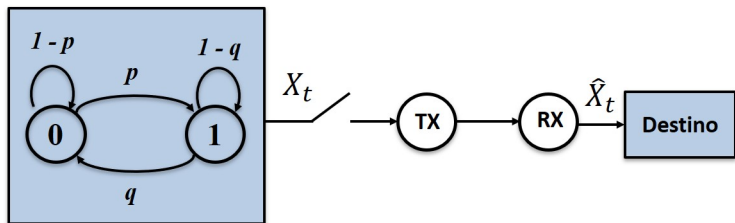
N. Pappas and M. Kountouris, "Goal-Oriented Communication For Real-Time Tracking In Autonomous Systems," 2021 IEEE International Conference on Autonomous Systems (ICAS), Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 1-5.

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Sistema de monitoramento em tempo real e reconstrução do sinal da fonte

Fonte: processo de Markov, 2 estados (X_t)

Transmissor observa fonte e envia amostra ao destino através de um canal com erros



Amostragem da fonte (quando quiser):

- $\alpha_t^S = 1$: transmissor amostra fonte no TS t.
- $\alpha_t^S = 0$: transmissor não amostra.

Transmissão:

- $\alpha_t^{tx} = 1$: transmissor transmite no TS t.
- $\alpha_t^{tx} = 0$: transmissor não transmite no TS t.

Canal: h_t

- $h_t = 1$: Sucesso
- $h_t = 0$: Falha - amostra é descartada (não há retransmissão)

Após receber uma mensagem, o destino envia à fonte um ACK (sucesso) ou um NACK (falha), através de um canal sem erros.

Duas métricas são consideradas:

- Erro de reconstrução

- Custo de erro de atuação

ERRO DE RECONSTRUÇÃO

$\hat{X}_t$: estado reconstruído

Erro de reconstrução: $E_t = \mathbb{1} (X_t \neq \hat{X}_t) = |X_t \neq \hat{X}_t|$

$E_t \in (0,1)$, para o caso da cadeia de 2 estados.

- ▶ $E_t = 0$: sincronizado
- ▶ $E_t = 1$: erro

Valor médio do erro:

$$\bar{E} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=1}^T E_t}{T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathbb{1} (X_t \neq \hat{X}_t)$$

CUSTO DE ERRO DE ATUAÇÃO

Deve representar o impacto do erro de reconstrução no ponto de atuação

$C_{i,j}$ é o custo por estar no estado i na origem e $j \neq i$ no destino (reconstruído).

Caso geral: $C_{i,j} \neq C_{j,i}$

Para calcular o valor médio do custo: Cadeia de Markov de duas dimensões: (estado na fonte, estado no destino)

Custo médio de erro de atuação:

$$\bar{C}_A = \pi_{(0,1)} C_{0,1} + \pi_{(1,0)} C_{1,0}$$

Quatro estratégias investigadas:

1. Amostragem uniforme
2. Amostragem controlada pelo Aol no destino
3. Amostragem controlada pela mudança de estado da fonte
4. Amostragem controlada pela semântica

Amostragem uniforme:

Amostras são tomadas periodicamente, a cada d slots.

Amostragem controlada pela Aol no destino:

Amostras são tomadas quando o Aol no destino ultrapassa um limiar A_{th}

Se transmissão é falha, destino estima o novo estado a partir de estatísticas inferidas sobre o processo.

Amostragem controlada pela mudança de estado da fonte:

Amostras são tomadas quando o estado da fonte muda.

Por exemplo: Considere que

$$X_{t+kt} = i, \quad k = 0, 1, \dots, K, \quad \text{e} \quad X_{t(K+1)+1} = j \neq i,$$

então uma amostra é tomada e enviada ao destino.

Portanto, a amostragem é indiferente ao estado do destino.

Amostragem controlada pela semântica:

Amostragens são feitas observando o estado da fonte e o estado reconstruído (no destino)

Amostragem ocorrem em dois casos:

1. Quando o sistema está sincronizado ($\hat{X}_t = X_t$) e a fonte muda de estado ($X_{t+1} \neq X_t$).
2. Quando o sistema não está sincronizado ($\hat{X}_t \neq X_t$) e $X_{t+1} = \hat{X}_t$

Amostragem controlada pela semântica – exemplo:

- ▶ Time-slot t : $\hat{X}_t = X_t = 0$ (sincronizado)
- ▶ Fonte muda de estado ($X_{t+1} = 1$): amostra é feita e transmitida

Se transmissão é bem sucedida (ACK): $\hat{X}_{t+1} = X_{t+1} = 1$ (ok!)

Se transmissão é falha (NACK): $\hat{X}_{t+1} = \hat{X}_t = 0$

Sistema passa a ficar não sincronizado ($\hat{X}_{t+1} = 0$ e $X_{t+1} = 1$)

Note que o transmissor está ciente que $\hat{X}_{t+1} = 0$

Amostragem controlada pela semântica – exemplo:

- ▶ Time-slot t : $\hat{X}_t = 1$ e $X_t = 0$ (não sincronizado)
- ▶ Se fonte **muda de estado** ($X_{t+1} = 1$): amostragem **não é feita**, pois $\hat{X}_t = X_{t+1}$
- ▶ Se fonte **não muda de estado** ($X_{t+1} = 0$): amostragem **é feita**, pois $\hat{X}_t \neq X_{t+1}$

Fonte

1. Variações lentas: $p = 0,1$ e $q = 0,15$
2. Variações rápidas: $p = 0,2$ e $q = 0,7$

Canal

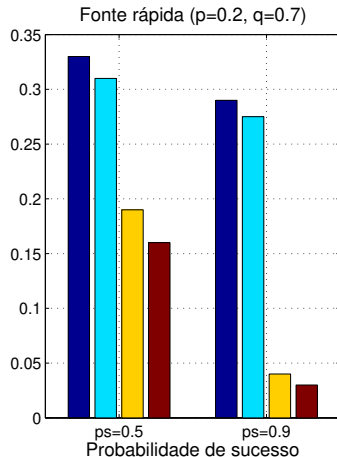
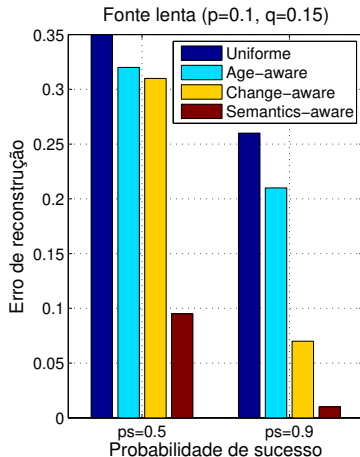
1. Pouco confiável $p_s = 0,5$
2. Confiável: $p_s = 0,9$

Custo de erro de atuação: $C_{0,1} = 5$ e $C_{1,0} = 1$

Amostragem uniforme: amostras a cada $d = 5$ time-slots

Amostragem controlada pelo Aol: $A_{th} = 5$

Cenários de variações lentas e rápidas⁹



⁹Figura baseada em N. Pappas and M. Kountouris, "Goal-Oriented Communication For Real-Time Tracking In Autonomous Systems," 2021 IEEE International Conference on Autonomous Systems (ICAS), Montreal, QC, Canada, 2021,

VALOR DA INFORMAÇÃO

Baseado no artigo

M. Giordani, T. Higuchi, A. Zanella, O. Altintas, and M. Zorzi, “A Framework to Assess Value of Information in Future Vehicular Networks”, 1st ACM MobiHoc Workshop on Technologies, mOdelS, and Protocols for Cooperative Connected Cars (TOP-Cars '19). ACM, New York, NY, USA, 31–36.

VALOR DA INFORMAÇÃO

Valor de uma medida (p.ex., amostra de um processo) depende do contexto.

Diversos fatores podem influenciar esse valor:

- Qualidade da media

- Frescor

- Novidade que a amostra traz

Proposta de formulação para o cálculo da prioridade de uma mensagem em função do valor de sua informação

Rede sem fio veicular

Veículos se comunicam entre si (*broadcast*) e são equipados com sensores

No instante t , veículo $v_i \in \mathcal{V}$ percebe um objeto na estrada e gera um vetor $o_i(t)$ com as medidas de seus sensores.

Pergunta fundamental: o veículo v_i deve enviar $o_i(t)$ aos veículos a sua volta?

Dois cenários são considerados:

1. Segurança
2. Gerenciamento de tráfego

VALOR DA INFORMAÇÃO

Valor da informação depende de atributos, associados à aplicação

No contexto de aplicações veiculares:

Frescor: amostras antigas tendem a ser menos relevantes – Aol no receptor

Proximidade: informação gerada por veículos próximos tem mais valor.

Qualidade da informação: (i) resolução do sensor, (ii) distância entre o objeto detectado e o sensor.

Desafio:

1. Quantificar
2. Priorizar

ESQUEMA GERAL PROPOSTO

Fase 1: Cálculo das prioridades (pesos)

Fase 2: Definição das funções dos atributos

Fase 3: Cálculo do Vol

FASE 1: ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

Proposto por Thomas Saaty¹⁰

AHP: procedimento para calcular os graus de prioridade entre um conjunto de atributos:

Atributos:

1. Pontualidade da informação
2. Proximidade entre fonte e destino
3. Qualidade da informação

Dados os graus de importância **relativa dois-a-dois**, quais são os graus de prioridade (pesos) dos atributos?

¹⁰Saaty, T. L. (2012). Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for in a Complex World. Third revised edition. Pittsburgh: RWS Publications

ESCALA DE SAATY PARA COMPARAÇÕES PAREADAS

Valor	Significado
1	Importância igual
3	Importância moderada
5	Importância forte ou essencial
7	Importância muito forte
9	Importância extrema
2, 4, 6, 8	Valores intermediários

PESOS DOS ATRIBUTOS

	Pontualidade	Proximidade	Qualidade
Pontualidade	1	α	β
Proximidade	$1/\alpha$	1	γ
Qualidade	$1/\beta$	$1/\gamma$	1

Matriz de comparação **M**

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \beta \\ 1/\alpha & 1 & \gamma \\ 1/\beta & 1/\gamma & 1 \end{bmatrix}$$

M é uma matriz recíproca:

$$\mathbf{M}(i,j) = 1/\mathbf{M}(j,i)$$

PESOS DOS ATRIBUTOS

Seja $\mathbf{w}$ o auto-vetor normalizado correspondente ao máximo auto-valor de $\mathbf{M}$

$$\mathbf{M} \mathbf{w} = \lambda_{\max} \mathbf{w}$$

Os pesos dos atributos são iguais aos componentes de $\mathbf{w}$ normalizados:

$$\text{Pesos} = \frac{1}{\sum w_i} [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_n]^T$$

EXEMPLO

Graus de importância relativa:

Pontualidade é $\alpha = 7$ vezes mais importante que proximidade

Pontualidade é $\beta = 3$ vezes mais importante que qualidade

Proximidade é $\gamma = 1/3$ vezes mais importante que qualidade

Portanto

pontualidade $\gg$ proximidade

pontualidade $>$ qualidade

qualidade $>$ proximidade

pontualidade $>$ qualidade $>$ proximidade

EXEMPLO

Formulação:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 3 \\ 1/7 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 3 & 1 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{Pontualidade} \\ \text{proximidade} \\ \text{qualidade} \end{array}$$

Máximo auto-valor: $\lambda_{\max} \approx 3$

Auto-vetor correspondente: $\mathbf{V} = [0.6694 \ 0.0879 \ 0.2426]^T$

Pesos:

$$w_{pt} = 0.6694 \quad \text{Pontualidade}$$

$$w_{px} = 0.0879 \quad \text{Proximidade}$$

$$w_{ql} = 0.2426 \quad \text{Qualidade}$$

Os atributos devem ser quantificados em função de parâmetros associados ao cenário em questão

Proximidade $v_{px}(d)$

$$v_{px}(d) = A + \frac{K - A}{(C + Qe^{-B(d-d_s)})^{1/\nu}}$$

d é a distância entre a fonte da informação e o destino

d_s é a distância de segurança – $v_1(d)$ cai para $d > d_s$

Pontualidade $v_{pt}(t)$

$$v_{pt}(t) = \exp[-P_{td} \times (t - t_o)],$$

$t - t_o$: Aol da medida

P_{td} : controla o decaimento de $v_{pt}(t)$ com o aumento do Aol.

$P_{td} = 0$: informação não é sensível à idade.

Qualidade – processada $v_{ql}(d_o)$

$$v_{ql}^p(d_o) = 1 - \frac{d_o}{h \cdot f_d},$$

h : Altura do sensor

d_o : Distância entre o sensor e o objeto percebido

f_d : Distância focal

Qualidade não processada $v_{ql}^{np}(d_o)$

$$v_{ql}^{np}(d_o) = \left(1 - \frac{d_o}{h \cdot f_d}\right) \times P_{LOS}(d_o),$$

d_o : Distância entre o sensor e o objeto percebido

f_d : Distância focal

$P_{LOS}(d_o)$ é a prob. de existir um caminho desobstruído entre o sensor e o objeto e, portanto, o objeto ser detectado.

$$P_{LOS}(d_o) = \begin{cases} \min\{1, 1.05e^{-0.0114d_o}\} & \text{se urbano} \\ \min\{1, (2.1 \cdot 10^{-6})d_o^2 - 0.002d_o + 1.02\} & \text{se estrada} \end{cases}$$

FASE 3: VALOR DA INFORMAÇÃO

O valor da informação será função de d , t e d_o :

$$v(d,t,d_o) = \sum_{x \in \{px,pt,ql\}} w_x \times v_x.$$

RESULTADOS NUMÉRICOS

Valores dos parâmetros:

Parâmetros	Valor
Altura do sensor h	1.2 m
Campo de visão da câmera f_w	70 deg
Distância TX/obs d_o	$d/2$
Distância TX/RX d	$\{1, \dots, 500\}$ m
Age of information $t - t_o$	$\{0, \dots, 5\}$ s
Distância de segurança d_s {urbano, estrada}	$\{24 \text{ e } 72\}$ m
Decaimento temporal P_{td} {stat, var, dyn}	$\{0,1,10\}$

Aplicação: Segurança ($C_R = 0,011$)

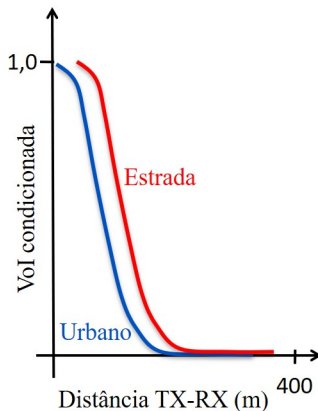
	Pontual.	Proxim.	Qualid.	Peso
Pontual.	1	1/7	1	0,1194
Proxim.	7	1	5	0,7471
Qualid.	1	1/5	1	0,1336

Aplicação: Controle de tráfego ($C_R = 0,069$)

	Pontual.	Proxim.	Qualid.	Peso
Pontual.	1	9	3	0,6554
Proxim.	1/9	1	1/7	0,0549
Qualid.	1/3	7	1	0,2897

VoI CONDICIONADA

Proximidade¹¹



¹¹ Figura baseada em M. Giordani, T. Higuchi, A. Zanella, O. Altintas, and M. Zorzi, "A Framework to Assess Value of Information in Future Vehicular Networks", 1st ACM MobiHoc Workshop on Technologies, mOdelS, and Protocols for Cooperative Connected Cars (TOP-Cars '19). ACM, New York, NY, USA, 31–36.

REFERÊNCIAS

- Marios Kountouris e Nikolaos Pappas, "Semantics-Empowered Communication for Networked Intelligent Systems," IEEE Communications Magazine, June 2021.
- D. Gündüz, F. Chiariotti, K. Huang, A. E. Kalør, S. Kobus and P. Popovski, "Timely and Massive Communication in 6G: Pragmatics, Learning, and Inference," in IEEE BITS the Information Theory Magazine, vol. 3, no. 1, pp. 27-40, March 2023.
- S. Kaul, R. Yates and M. Gruteser, "Real-time status: How often should one update?," 2012, Proceedings IEEE INFOCOM, 2012, pp. 2731-2735.
- H. Chen, Y. Gu and S. -C. Liew, "Age-of-Information Dependent Random Access for Massive IoT Networks," IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Toronto, ON, Canada, 2020, pp. 930-935
- N. Pappas and M. Kountouris, "Goal-Oriented Communication For Real-Time Tracking In Autonomous Systems," 2021 IEEE International Conference on Autonomous Systems (ICAS), Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 1-5
- M. Salimnejad, M. Kountouris, A. Ephremides, and N. Pappas, "Age of Information Versions: a Semantic View of Markov Source Monitoring," arXiv preprint arXiv: 2406.14594, 2024.
- M. Salimnejad, A. Ephremides, M. Kountouris and N. Pappas, "Optimizing Version Innovation Age for Monitoring Markovian Source in Energy-Harvesting Systems," 2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference.
- A. Maatouk, S. Kriouile, M. Assaad and A. Ephremides, "The Age of Incorrect Information: A New Performance Metric for Status Updates," in IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 28, no. 5, pp. 2215-2228, Oct. 2020.
- M. Giordani, T. Higuchi, A. Zanella, O. Altintas, and M. Zorzi, "A Framework to Assess Value of Information in Future Vehicular Networks", 1st ACM MobiHoc Workshop on Technologies, mOdelS, and Protocols for Cooperative Connected Cars (TOP-Cars '19). ACM, New York, NY, USA, 31-36.
- F. I. Dretske, *Knowledge and the Flow of Information*. MIT Press, 1981.
- W. Weaver, "Recent contributions to the mathematical theory of communication," ETC: a review of general semantics, pp. 261-281, 1953.