

Modelagem Computacional para Avaliação da Age of Information (AoI) em Sistemas Ciberfísicos

Paulo César Prandel¹, Priscila Solis Barreto¹

¹Departamento de Ciência da Computação – Universidade de Brasília (UNB)
Brasília – DF – Brasil

paulo.prandel@aluno.unb.br, pris@unb.br

Abstract. *Age of information (AoI) is a concept that defines a metric related to the degree of update that a monitor has in relation to one or more information sources, which send sequential update packets. The present study proposes the use of AoI to evaluate and optimize a Cyber Physical System characterized as a monitoring and decision-making system in the context of military command and control (C2) activity. In this type of system, agents periodically send their georeferenced positions to an operations center and common scenarios may have different degrees of criticality. To achieve this goal, this work developed a computational model to calculate the AoI, which was used as a basis for the implementation of a simulation tool. In addition to the aforementioned tool, this work contributed to the improvement of current package management techniques for the optimization of AoI, by proposing two new techniques: Last Generated - First Served - Conditional (LGFS-C), for single-source, single-server models, and Max Age First - Last Generated - First Served - Multiple preemption in Waiting (MAF-LGFS-MW), for multiple-source, multiple-server models. Both techniques, when evaluated, showed results equal or better than current state of the art techniques. As a last contribution, this research applies an evaluation methodology, using the developed tool in different usage scenarios.*

Resumo. *A Age of Information (AoI) é um conceito que define métricas relacionadas ao grau de atualização que um monitor possui em relação a uma ou mais fontes de informação, as quais enviam pacotes sequenciais de atualização. O presente estudo propõe a utilização da AoI para a avaliação e otimização de um Sistema Ciberfísico (SCF) caracterizado como um sistema de monitoramento e decisão no contexto da atividade de comando e controle (C2) militar. Nesse tipo de sistema, agentes enviam periodicamente suas posições georreferenciadas para um centro de operações e os cenários de uso podem ter diferentes graus de criticidade. Para atingir esse objetivo, este trabalho desenvolveu um modelo computacional para cálculo da AoI, o qual foi usado como base para a implementação de uma ferramenta de simulação. Além da referida ferramenta, este trabalho contribuiu para a melhoria das atuais técnicas de gerenciamento de pacotes para a otimização da AoI, ao propor duas novas técnicas: a Last Generated - First Served - Conditional (LGFS-C), para modelos de uma fonte e um servidor e a Max Age First - Last Generated - First Served - Multiple preemption in Waiting (MAF-LGFS-MW), para modelos de múltiplas fontes e múltiplos servidores. Ambas as técnicas, quando avaliadas, mostraram resultados iguais ou melhores do que as atuais técnicas no estado da arte. Como última contribuição, o trabalho aplica uma metodologia de avaliação com o uso da ferramenta desenvolvida em diferentes cenários de uso.*

1. Introdução

Os conflitos modernos encontram-se cada vez mais dependentes da tecnologia, sendo grande parte de suas ações travadas nos ambientes cibernético e informacional. A superioridade de informações e a rapidez das ações são fatores decisivos para o sucesso ou o fracasso uma operação militar. Os Sistemas de comando e controle (C2) são a base para o processo decisório em operações militares, garantindo aos comandantes a execução de seus ciclos com rapidez, precisão e oportunidade [Brasil 2015]. Esses sistemas são compostos por elementos físicos (agentes, sensores, decisores, etc) e computacionais (redes, algoritmos e outros). Nesse contexto, os sistemas de C2 podem ser estudados como Sistemas Ciberfísicos (SCF) [Bhattacharyya and Wolf 2020].

Para que a atividade de comando e controle atinja seus objetivos, torna-se necessário organizar e implementar o SCF pelo espaço de batalha. Para essa finalidade, diferentes sensores são alocados com o objetivo de enviar atualizações (*updates*) para um Centro de Operações (COP), como posição e velocidade de tropas e veículos, imagens, dados de radares, dados meteorológicos, entre outros. O desempenho desse sistema será função das tecnologias agregadas, as quais devem garantir a rapidez e a qualidade das informações que ali trafegam. Por esse motivo, é necessário estabelecer métricas que possam avaliar tais sistemas, especialmente aquelas relacionadas à rapidez e à oportunidade com que a informação flui entre os diferentes elementos. Dentro desse contexto, a AoI, a qual pode ser traduzida como *Idade da Informação*, apresenta-se como um novo conceito e métrica, capaz de avaliar o quão atualizada está uma determinada informação em posse de um monitor em relação à fonte onde foi produzida. Tomando-se como exemplo a Fig. 1, o monitor é o Centro de Operações e as fontes de informação são as posições dos agentes em campo, enviadas de maneira periódica.

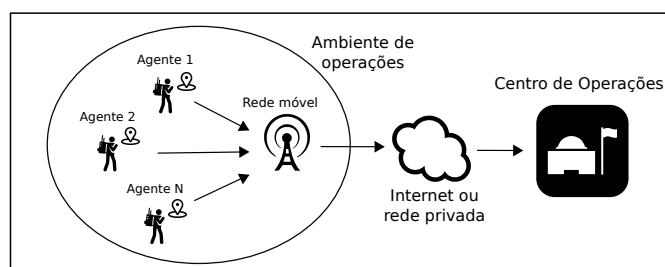


Figura 1. Modelo de um sistema de comando e controle.

Trata-se de uma tema de pesquisa relativamente novo, que apresenta um crescente número de trabalhos publicados nos últimos anos, como uma proposta para solucionar o problema de regimes de envio de atualizações em redes de sensores [Kaul et al. 2012]. O presente trabalho parte da premissa de que essa métrica pode ser aplicada para a avaliação de SCF, como por exemplo um sistema de monitoramento e decisão militar, possibilitando assim o estabelecimento de metodologias para a definição de arquiteturas e o dimensionamento da infraestrutura de sistemas de C2.

Definição do problema

O problema central do presente estudo é como utilizar o conceito de *Age of Information* para avaliar e otimizar sistemas ciberfísicos, em especial um sistema de monitoramento e decisão voltado para a atividade de comando e controle militar.

2. Conceitos Teóricos e Trabalhos Relacionados

A presente seção tem por finalidade apresentar os principais conceitos teóricos necessários para o entendimento deste estudo, bem como os trabalhos mais recentes na pesquisa da área.

2.1. Age of Information

A *Age of Information* (AoI) [Yates et al. 2021] representa o grau de atualidade que um monitor possui sobre determinado processo ou entidade, a qual envia pacotes de atualização periódicos para esse monitor. Em termos analíticos, um determinado pacote com tempo de geração u possui uma AoI dada por $t - u$ em um tempo $t \geq u$. Dessa maneira, a AoI no monitor em um tempo t pode ser definida como o processo aleatório $\Delta(t) = t - u(t)$, onde $u(t)$ é o tempo de geração do último pacote recebido. A Fig. 2 ilustra o formato *dente-de-serra* característico desse processo.

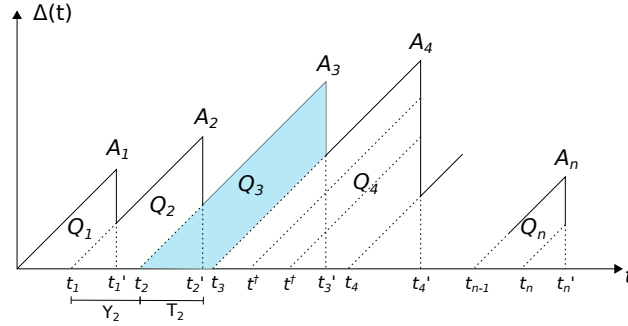


Figura 2. Comportamento característico do processo AoI.

A AoI média $\langle \Delta \rangle_\tau$ pode ser calculada somando-se a área sob o gráfico e dividindo esse valor pelo tempo decorrido. Em um regime estacionário e ergódico, a $\langle \Delta \rangle_\tau$ é definida de acordo com a Eq. 1.

$$\langle \Delta \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \Delta(t) dt \quad (1)$$

2.2. Gerenciamento de pacotes

Gerenciamento de pacotes é o nome dado ao conjunto de técnicas que visam atuar sobre os pacotes que chegam à uma estrutura fila-servidor para terem sua informação processada. Essa atuação pode ser realizada através de priorização, bloqueio e preempção (descarte e substituição do pacote por outro), tendo por objetivo otimizar as métricas da AoI. Um dos primeiros estudos dessa técnica foi realizado por [Costa et al. 2016]. A priorização pode ser realizada através de regimes de serviço que priorizem os pacotes mais recentes ou frescos, como por exemplo o regime *Last Come First Served* (LCFS), no qual o último pacote que chega na fila é o primeiro a ser servido. Já o regime *Last Generated First Served* (LGFS), abordado em [Sun et al. 2018], é especialmente eficiente em sistemas onde os pacotes chegam fora da ordem de geração. O bloqueio de novos pacotes consiste em limitar o tamanho de uma fila, impedindo o recebimento de novos pacotes pelo conjunto fila-servidor enquanto o mesmo estiver em sua capacidade máxima. Já a preempção, conforme ilustrado pela Fig. 3, é o ato de substituir pacotes, podendo esse pacote estar em serviço (*service - S*) (Fig. 3a) ou na fila de espera (*waiting - W*) (Fig. 3b). Os principais modelos para essas técnicas são o servidor sem fila de espera e o servidor com uma única posição de espera. Alguns autores utilizam o termo *preempção* (P) para o caso de

preempção em serviço e *não preempção* (NP) para o caso de preempção na fila de espera. Para fins de padronização, este trabalho adotará a nomenclatura com os sufixos *S* e *W* citados acima.

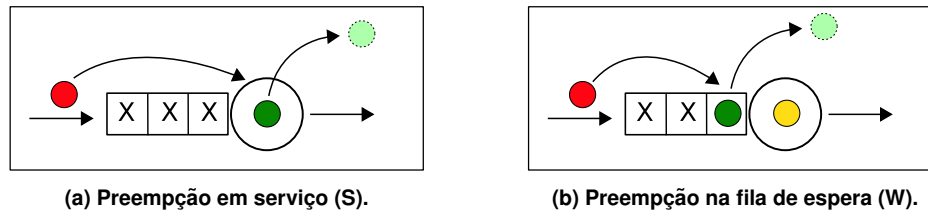


Figura 3. Técnicas de preempção de pacotes.

2.3. Trabalhos relacionados

O trabalho de [Yates et al. 2021] apresenta uma introdução sobre AoI bem como um *survey*, elencando os principais estudos em diversas áreas de aplicação da *Age of Information*. Os autores apresentam a maioria dos modelos básicos de filas estudados para estimar a AoI, com os modelos analíticos correspondentes. Além disso, são definidas as principais técnicas de gerenciamento de pacotes com suas respectivas análises de desempenho.

[Kosta et al. 2019] apresenta uma proposta de um sistema em que diversas fontes concorrem ao acesso de um receptor. Cada uma das fontes individuais é modelada como uma fila de capacidade infinita, a qual possui ainda a possibilidade de descartar pacotes com o intuito de otimizar a AoI no monitor. Outro estudo que aborda o caso de múltiplas fontes que convergem para um conjunto servidor-monitor foi abordado em [Akar 2021], o qual utiliza modelos de tempo discreto para filas para obter resultados exatos da distribuição da AoI para cada uma das fontes de pacotes. [Kaul and Yates 2018] modela um sistema de múltiplas fontes e atribui prioridades a cada uma delas.

Em [Bedewy et al. 2017] é definido o regime de serviço conhecido como *Last Generated First Served - Preemptive* (LGFS-P), o qual utiliza a preempção em serviço para otimizar a AoI em sistemas com múltiplos servidores e distribuição de tempo de serviço exponencial. Já [Bedewy et al. 2019a] apresenta resultados para um modelo de rede com múltiplos saltos, ao mostrar que a técnica LGFS-P não otimiza modelos com tempos de serviço cuja distribuição não é exponencial. Em um outro trabalho do mesmo autor [Bedewy et al. 2019b], é demonstrado que, para uma distribuição de tempo de serviço pertencente à classe *New Better than Used* (NBU), a técnica conhecida como LGFS-NP ou LGFS-W (não preemptiva ou com preempção na fila de espera, segundo outros autores) atinge valores quase ótimos para a AoI média, com uma pequena diferença constante de um limite inferior estabelecido. Essas duas técnicas (LGFS-P e LGFS-W) são utilizadas como base para a nova técnica proposta neste trabalho, a *Last Generated - First Served - Conditional* (LGFS-C), que será apresentada adiante.

O trabalho realizado por [Sun et al. 2018] aborda o caso de um modelo com múltiplas fontes e múltiplos servidores, ao definir duas técnicas de gerenciamento de pacotes sem descarte, *Maximum Age First, Last Generated First Served* (MAF-LGFS) e *Maximum Age of Served Information First, Last Generated First Served* (MASIF-LGFS). Essas técnicas são a base para outra nova técnica proposta no presente estudo, a *Max Age First - Last Generated - First Served - Multiple preemption in Waiting* (MAF-LGFS-MW).

3. Contribuições e Resultados

A presente seção apresenta as contribuições e resultados obtidos na realização desta pesquisa.

3.1. Modelo Computacional para a Avaliação da AoI

A maioria dos trabalhos voltados para o cálculo das métricas da AoI utiliza modelos analíticos, cuja complexidade de obtenção aumenta proporcionalmente com a complexidade do sistema em estudo, conforme se observa em [Bedewy et al. 2019b], [Bedewy et al. 2019a] e [Sun et al. 2018]. Com o objetivo de obter uma alternativa para a obtenção das métricas da AoI, esta pesquisa propôs um modelo computacional formal para a representação de uma rede de filas e a avaliação das métricas da AoI através de simulação, conforme apresenta [Prandel and Barreto 2021]. Para o controle da precisão das simulações, é utilizado o método de Monte Carlo, obtendo valores esperados para a raiz do erro quadrático médio (REQM). A metodologia proposta, bem como a implementação da mesma em código aberto [Prandel 2022], foi utilizada para se obter todos os resultados apresentados no presente trabalho.

As simulações obtidas através do modelo computacional apresentaram resultados coerentes com resultados obtidos através de modelos analíticos, conforme se observa na Fig. 4, o que valida o modelo e permite aplicá-lo a estruturas mais complexas, onde a modelagem analítica torna-se ineficiente.

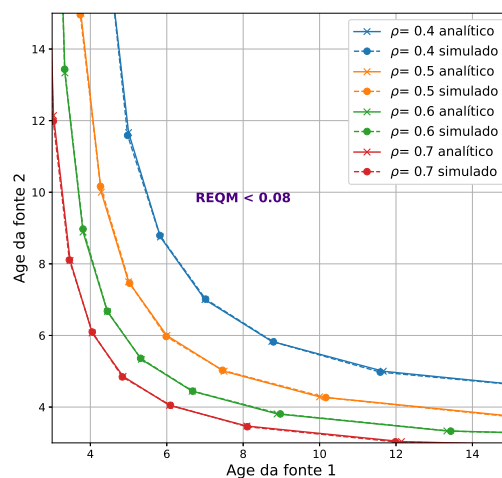


Figura 4. Comparação entre os resultados analíticos e simulados para um modelo com duas fontes utilizando o um regime LCFS com precedência em serviço, do tipo $M/M/1/1^*$, para diversos valores da carga total (ρ) no servidor ($\mu = 1$).

3.2. A Técnica LGFS-C

As técnicas existentes até a elaboração desta pesquisa podem ser consideradas estáticas, no sentido de que a decisão de se realizar a preempção, seja em serviço (LGFS-S) ou na fila de espera (LGFS-W), é aplicada de maneira uniforme a todos os pacotes que chegam à fila. Com a motivação de melhorar os resultados no estado da arte, uma das contribuições deste estudo é a proposta de uma nova técnica de gerenciamento de pacotes, a qual toma decisões de preempção de maneira dinâmica em função do estado atual do sistema. Essa

técnica é chamada *Last Generated - First Served - Conditional* (LGFS-C), em que a letra 'C' significa preempção condicional, representando um avanço em relação às técnicas LGFS-S e LGFS-W ao utilizar o conceito de vida residual média (VRM) como um dos fatores de decisão.

Conforme [Prandel and Barreto 2022a], a referida técnica obtém valores de AoI média sempre iguais ou menores à AoI média que seria produzida pelas técnicas LGFS-S ou LGFS-W, para qualquer distribuição de tempo de serviço. Esses resultados são demonstrados analiticamente e validados através de simulação utilizando o modelo computacional. A Fig. 5 apresenta uma comparação dos resultados entre as técnicas do estado da arte (LGFS-S e LGFS-W) e a técnica proposta LGFS-C para uma distribuição do tempo de serviço do tipo *Weibull*.

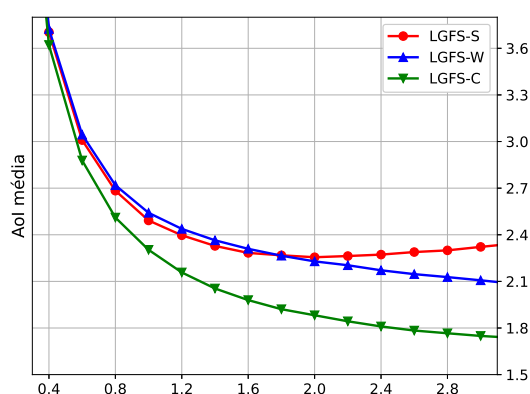


Figura 5. Comparativo da técnica LGFS-C com as demais técnicas no estado da arte.

3.3. A Técnica MAF-LGFS-MW

A técnica LGFS-C consiste em um modelo aplicável para uma fonte e um servidor. Com o objetivo de se obter uma técnica de gerenciamento de pacotes para múltiplas fontes e múltiplos servidores, este estudo propôs outra técnica chamada *Max Age First - Last Generated First Served - Multiple preemption in Waiting* (MAF-LGFS-MW), a qual agrega características de duas técnicas no estado da arte, a MAF-LGFS e a MASIF-LGFS ([Sun et al. 2018], com o diferencial de realizar a preempção em múltiplas filas de espera. Resultados obtidos através de simulação são exibidos na Fig. 6, mostrando os resultados superiores da técnica (menor AoI média) proposta para distribuições de tempo de serviço do tipo *Weibull*.

3.4. Avaliação Baseada em Cenários de Uso

A presente pesquisa obteve uma metodologia para avaliação de diferentes cenários de uso nos sistemas de monitoramento e decisão voltados para a atividade de comando e controle em operações militares. O principal critério que diferencia os possíveis cenários é a criticidade em termos da atualização das informações dos agentes no monitor. Essa metodologia permite obter um número máximo para agentes alocados em campo, dada uma determinada capacidade de infraestrutura (quantidade e taxa de serviço dos servidores, atraso da rede, etc) em função da AoI média e AoI de pico vistas pelo centro de operações sem relação à posição georreferenciada dos agentes. A Fig. 7 ilustra um dos resultados obtidos para um cenário considerado crítico, onde o limite máximo para a AoI média do conjunto de agentes foi definido em 3 segundos e o limite para a AoI de pico foi definido em 5 segundos.

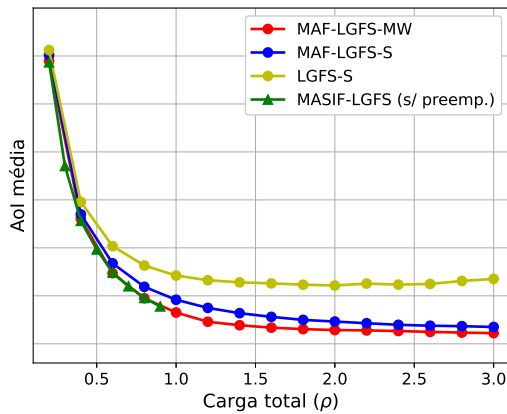


Figura 6. Comparativo da técnica MAF-LGFS-MW com as demais técnicas no estado da arte.

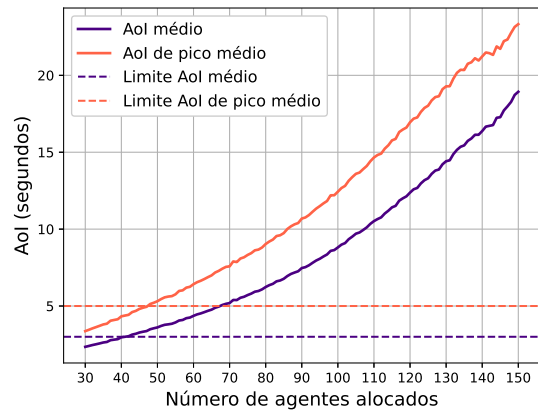


Figura 7. Número máximo de agentes em campo em função da AoI média e AoI de pico.

4. Resumo dos Subprodutos do Trabalho

O presente trabalho produziu, ao longo da pesquisa, três artigos científicos publicados e um repositório de código:

- Em [Prandel and Barreto 2021] é proposto um modelo computacional e uma ferramenta para simular uma rede de filas, possibilitando a avaliação de métricas relacionada a AoI, como a AoI média e a AoI de pico.
- [Prandel and Barreto 2022a] propõe uma nova técnica de preempção condicional de pacotes, cujo critério de decisão utiliza o conceito de vida média residual;
- Em [Prandel and Barreto 2022b] é apresentada a implementação de uma ferramenta de simulação baseada no modelo computacional proposto pelos mesmos autores;
- O repositório de [Prandel 2022] fornece para a comunidade acadêmica uma ferramenta de código aberto com instruções para a simulação de redes de filas, visando a avaliação de métricas relacionadas com a AoI.
- Uma versão estendida do artigo [Prandel and Barreto 2022a] foi convidada para ser publicada no *Journal Adhoc Networks* (Elsevier), a qual se encontra atualmente em processo de avaliação.

5. Conclusão

Acredita-se que o presente trabalho contribuiu para desenvolvimento da pesquisa relacionada à *Age of Information* e aos sistemas ciberfísicos. Na área militar, em especial nos sistemas e estruturas de comando e controle, pode-se utilizar diretamente os conceitos e técnicas propostos, os quais podem colaborar com a melhoria dos atuais processos de avaliação e dimensionamento desses sistemas. Como trabalhos futuros, vislumbra-se o aperfeiçoamento das técnicas propostas neste estudo, as quais, apesar de produzirem resultados melhores que as técnicas no estado da arte, ainda não são consideradas ótimas.

Referências

Akar, N. (2021). Discrete-time queueing model of age of information with multiple information sources. *IEEE Internet of Things Journal*, pages 1–1.

- Bedewy, A., Sun, Y., and Shroff, N. (2019a). The age of information in multihop networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 27:1248–1257.
- Bedewy, A. M., Sun, Y., and Shroff, N. B. (2017). Optimizing data freshness, throughput, and delay in multi-server information-update systems.
- Bedewy, A. M., Sun, Y., and Shroff, N. B. (2019b). Minimizing the age of information through queues. *IEEE Transactions on Information Theory*, 65(8):5215–5232.
- Bhattacharyya, S. S. and Wolf, M. C. (2020). Research challenges for heterogeneous cyberphysical system design. *Computer*, 53(7):71–75.
- Brasil (2015). Comando e controle - Manual de campanha.
- Costa, M., Codreanu, M., and Ephremides, A. (2016). On the age of information in status update systems with packet management. *IEEE Transactions on Information Theory*, 62(4):1897–1910.
- Kaul, S., Yates, R., and Gruteser, M. (2012). Real-time status: How often should one update? In *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*, pages 2731–2735.
- Kaul, S. K. and Yates, R. D. (2018). Age of information: Updates with priority. In *2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, pages 2644–2648.
- Kosta, A., Pappas, N., Ephremides, A., and Angelakis, V. (2019). Age of information performance of multiaccess strategies with packet management. *Journal of Communications and Networks*, 21(3):244–255.
- Prandel, P. (2022). Uma ferramenta de simulação para a age of information. <https://github.com/pprandel/aoi-simulator>.
- Prandel, P. and Barreto, P. (2022a). Preempção condicional de pacotes baseada na vida média residual para otimização da age of information em sistemas ciberfísicos. In *Anais do XL Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 461–474, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Prandel, P. and Barreto, P. (2022b). Um simulador para o cálculo e otimização da age of information (aoi) em sistemas ciberfísicos. In *Anais Estendidos do XL Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 89–96, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Prandel, P. C. and Barreto, P. S. (2021). Computational modeling of age of information for cyber-physical systems. In *2021 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, pages 1–6.
- Sun, Y., Uysal-Biyikoglu, E., and Kompella, S. (2018). Age-optimal updates of multiple information flows.
- Yates, R. D., Sun, Y., Brown, D. R., Kaul, S. K., Modiano, E., and Ulukus, S. (2021). Age of information: An introduction and survey. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(5):1183–1210.