

Um Simulador para o Cálculo e Otimização 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. *The Age of Information (AoI) emerges as a new concept and set of metrics that represent the degree of freshness that a monitor has in relation to a remote entity or process that sends updates in a periodically way. These metrics can be applied in the evaluation of Cyber-Physical Systems (CPS), such as a monitoring system composed of several sensors, a network and a monitor. Most of the works in the literature use an analytical approach, obtaining exact expressions for AoI. This approach, however, is limited by the difficulty encountered in modeling as the CPS under study becomes more complex, motivating the use of other evaluation methods, such as the use of simulations. Thus, this work proposes a simulation tool based on a computational model for the evaluation of AoI in CPS. Such a tool is capable of evaluating any kind of system, also using several package management techniques present in the literature for the optimization of AoI. Finally, the tool also returns a statistical analysis of the simulation accuracy.*

Resumo. *A Age of Information (AoI) surge como um novo conceito e conjunto de métricas que representam o grau de atualização da informação que um monitor possui em relação a uma entidade ou processo remoto que envia atualizações periodicamente. Essas métricas podem ser aplicadas na avaliação de Sistemas Ciberfísicos (Cyber Physical Systems - CPS), como por exemplo um sistema de monitoramento composto por diversos sensores, uma rede e um monitor. Na revisão da literatura verifica-se que a maior parte dos trabalhos explora a abordagem analítica para obter expressões exatas para o cálculo da AoI. Essa abordagem, no entanto, é limitada pelas dificuldades encontradas na modelagem à medida em que o CPS em estudo se torna mais complexo, o que motiva a utilização de outros métodos de avaliação, como o uso de simulações. Dessa forma, este trabalho propõe uma ferramenta de simulação baseada em um modelo computacional para a avaliação da AoI em CPS. Tal ferramenta é capaz de avaliar qualquer modelo de sistema, ao aplicar ainda diversas técnicas de gerenciamento de pacotes presentes na literatura para a otimização da AoI. Por fim, a ferramenta prova a sua qualidade ao retornar uma análise estatística da precisão dos resultados da simulação.*

1. Introdução

Os sistemas modernos cada vez mais convergem para combinações entre componentes cibernéticos e físicos nos mais diversos níveis. Tais sistemas, chamados de Ciberfísicos (do

inglês *Cyber Physical Systems - CPS*), integram aspectos computacionais com a rede e os processos físicos, que operam em ambientes não estruturados em escalas multiespaciais e multitemporais, com o uso de controles inteligentes e fusão multimodal de informações [Bhattacharyya and Wolf 2020]. Entre as características dos CPS, pode-se citar as capacidades cibernéticas em todos os componentes físicos, que permitem um alto grau de automação, reorganização e reconfiguração dinâmicas. Como exemplo de um CPS, pode-se citar um sistema de monitoramento, no qual um grupo de sensores observam determinado processo físico e encaminham pacotes de atualização pela rede até um monitor, o qual processa as informações recebidas.

Nos últimos anos, um dos tópicos que tem se destacado na pesquisa de CPS é a *Age of Information (AoI)* [Kaul et al. 2012, Yates and Kaul 2019, Yates et al. 2021]. Esse conceito e métrica pode ser definido como o grau de atualidade que um monitor possui em relação a um determinado processo ou ambiente, a partir do envio de pacotes de atualização de maneira periódica. Ao integrar este conceito no exemplo de um sistema de monitoramento, a AoI pode ser utilizada para se garantir que o monitor receberá as informações dos sensores em tempo hábil, o que possibilita que o monitor atue ou decida sobre o processo físico com oportunidade.

A grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura realiza uma abordagem analítica para o estudo da AoI [Yates and Kaul 2019], [Moltafet et al. 2020] e [Inoue et al. 2019], ao obter resultados com expressões matemáticas que permitem uma análise da AoI, seja em modelos simples ou de mediana complexidade. Essa abordagem analítica, no entanto, torna-se complexa à medida em que o sistema em estudo também se torna mais complexo, como é o caso de um CPS. Em alguns casos, a arquitetura do CPS em termos do número de fontes e servidores, inviabiliza a obtenção de um modelo analítico simples e confiável, o que dificulta a avaliação do modelo e a sua consequente otimização. Para esses casos, os autores tendem a simplificar os modelos, como em [Yates 2018], ou estabelecer teoremas para tentar encontrar técnicas de otimização ou quase-otimização [Bedewy et al. 2019][Bedewy et al. 2017][Sun et al. 2018]. Tais trabalhos, no entanto, tendem a apresentar resultados simulados sem maiores detalhes sobre o seu processo, não fornecendo dados a respeito da técnica utilizada e sem apresentar uma análise estatística da precisão dos resultados.

Uma vez apresentado o problema e com a motivação de fornecer novas ferramentas para a análise da AoI em CPS, este trabalho propõe uma ferramenta de simulação de sistemas ciberfísicos baseada em uma rede de filas, capaz de avaliar tais sistemas com base nas métricas da *Age of Information* e ainda fornecer uma análise estatística da precisão dos resultados. Ressalta-se que, até o momento da realização deste trabalho, não foram identificadas outras ferramentas formalmente elaboradas e disponibilizadas para a análise da AoI em CPS. Dessa maneira, tal ferramenta pode trazer benefícios tanto para pesquisadores da área, os quais podem utilizá-la para desenvolver novas técnicas ou validar modelos analíticos, quanto para engenheiros e analistas de CPS, como por exemplo aqueles envolvidos nas atividades de definição de arquiteturas e avaliação de desempenho.

2. O Conceito de *Age of Information (AoI)*

A AoI pode ser definida como o grau da atualidade de uma informação que um monitor possui sobre determinado processo ou entidade, a qual envia pacotes de atualização

periódicos. Em termos analíticos, um determinado pacote de atualização com tempo de geração u possui uma AoI dada por $t - u$ em um tempo $t \geq u$. Dado que um monitor recebe uma atualização no tempo t e que essa atualização possui um *timestamp* $u(t)$, a AoI é definida como o processo randômico $\Delta(t) = t - u(t)$.

No momento em que o monitor recebe um pacote de atualização, a AoI observa um decaimento instantâneo. Entre os recebimentos, a AoI aumenta de maneira linear com o tempo. Esse comportamento é mostrado no gráfico da Fig. 1, onde se observa o formato *dente-de-serra* característico do processo AoI.

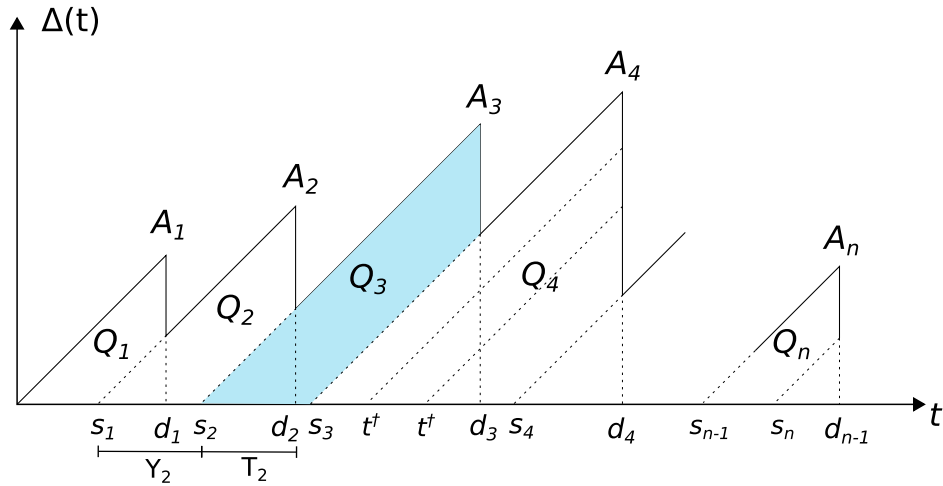


Figura 1. Comportamento característico do processo *Age of Information*

Na Fig. 1, são definidos os seguintes termos utilizados na modelagem da AoI:

- s_i : tempo de chegada do pacote i .
- d_i : tempo de partida do pacote i .
- t^\dagger : pacote perdido ou descartado.
- Y_i : tempo entre as chegadas dos pacotes $i - 1$ e i (*interarrival time*).
- T_i : tempo entre a chegada do pacote i e a partida do mesmo pacote. Também chamado de *system time*.
- A_i : valores de pico da AoI.

Uma das métricas de maior interesse é a AoI média $\langle \Delta \rangle$, a qual pode ser calculada somando-se a área sob o gráfico e dividindo-a pelo tempo decorrido τ . Em um regime estacionário, pode-se defini-la conforme a Eq. 1.

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

Além da AoI média, outra métrica muito utilizada é a AoI de pico $\Delta^{(p)}$, cujo valor pode ser calculado pela Eq. 4.

$$\Delta^{(p)} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N A_n \quad (2)$$

A literatura apresenta diversos modelos analíticos para a obtenção da AoI e da AoI de pico, como por exemplo [Kaul et al. 2012, Yates and Kaul 2019, Inoue et al. 2019, Pappas et al. 2015]. Esses modelos analíticos, no entanto, acabam se restringindo a sistemas mais simples, o que inviabiliza sua aplicação em CPS mais complexos. Dessa maneira, para que se possa estimar as métricas da AoI para qualquer tipo de sistema, será apresentado um modelo computacional, o qual será a base para a ferramenta de simulação proposta neste trabalho.

3. Apresentação da ferramenta

A presente seção apresentará em detalhe a ferramenta de simulação, com foco na sua arquitetura e principais funcionalidades. Será também apresentado um caso de uso para um sistema de monitoramento.

3.1. Arquitetura

A ferramenta de simulação foi baseada em um projeto Python chamado *queueing-tool* [Jordon 2016], cuja finalidade é simular uma rede de filas, a qual é instanciada através de um grafo direcionado. O referido projeto, no entanto, por ser genérico, não possuía as funcionalidades necessárias para se estimar a AoI, como também carecia dos regimes de serviço e de gerenciamento de pacotes utilizados na otimização dessa métrica, já definidos na literatura. Dessa maneira, através da extensão e criação de novas classes e da implementação de novos métodos, foi desenvolvido um conjunto de funções especialmente orientadas para a estimação da AoI em um sistema ciberfísico baseado em uma rede de filas.

O principal componente da arquitetura da ferramenta é um grafo direcionado que representa a rede, o qual deve ser definido pelo usuário em função do CPS a ser simulado. Esse grafo é definido matematicamente por $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, em que \mathcal{V} é o conjunto de nós e \mathcal{E} representa o conjunto de arestas, as quais são definidas por $\mathcal{E} \subseteq \{(x, y) | (x, y) \in \mathcal{V}^2, x \neq y\}$. Para cada um dos nós desse grafo é instanciada uma fila, em que os valores dos parâmetros a seguir devem ser definidos:

- Função tempo de serviço $M_i(t), i \in \mathcal{V}$.
- Tamanho da fila.
- Número de servidores que atendem a fila.
- Disciplina de serviço da fila (e.g. *Last Come First Served*).
- Técnica de gerenciamento de pacotes (opcional).

As funções de tempo de serviço devem retornar um valor numérico, cuja geração pode ser determinística ou randômica. As disciplinas de serviço, juntamente com as técnicas de gerenciamento de pacotes, definem em que ordem e com que prioridade os pacotes recebidos pelas filas são processados, bem como quais técnicas serão utilizadas para a otimização da AoI. Algumas das disciplinas e técnicas implementadas são:

- *First Come First Served* (FCFS) sem técnicas de gerenciamento.
- *Last Come First Served* (LCFS), com preempção em serviço (LCFS-S) ou preempção na fila de espera (LCFS-W).
- *Last Generated First Served* (LGFS) com preempção em serviço (LGFS-S), com preempção na fila de espera (LGFS-W).

Uma vez definida a estrutura da rede, torna-se necessário definir quais nós serão fontes de pacotes (no mínimo um) e qual nó será o monitor (obrigatoriamente apenas um). Essas definições são essenciais para a modelagem da AoI, a qual é tomada sempre no monitor em relação às fontes. Dessa maneira, esse subconjunto de nós fontes passa a ser definido por $\mathcal{V}^* \subset \mathcal{V}, |\mathcal{V}^*| \geq 1$. Outra restrição para a montagem do grafo é que os possíveis caminhos não podem possuir nós ou arestas repetidas, devendo ainda sempre convergir para o nó monitor.

A carga de trabalho, por sua vez, é definida pelos pacotes gerados nas fontes, sendo definida por $\mathcal{W} \subseteq \{(i, j) | i \in \mathcal{V}^*, j = 1, 2, \dots\}$, onde o índice i identifica a fonte de origem e o índice j é o sequencial do pacote. Adicionalmente, cada fonte deve possuir uma função geradora $G_i(t), i \in \mathcal{V}^*$, a qual define o processo pelo qual são criados os pacotes. Em termos de implementação essas funções são de livre escolha, devendo retornar um valor de tempo numérico, randômico ou não, o qual corresponde ao intervalo entre a geração de dois pacotes, o que confere uma grande flexibilidade à ferramenta.

Durante a execução da simulação, o sistema armazenará, para cada um dos nós, uma lista de informações referente à passagem dos pacotes. Essa lista é estruturada no formato $(i, j, s_i^j) : [a_i^j, v_i^j, d_i^j]$, no qual:

- (i, j, s_i^j) : identificador do pacote, sendo i a fonte de origem, j o índice do pacote e s_i^j o seu tempo de geração.
- a_i^j : tempo de chegada do pacote no nó.
- v_i^j : tempo de início do serviço do pacote no nó.
- d_i^j : tempo de partida do pacote do nó.

Essas listas contém todas as informações necessárias para o cálculo da AoI, podendo essa métrica ser tomada no monitor (mais usual) ou em qualquer um dos nós intermediários. Para se obter os resultados, a lista deve ser submetida a uma função responsável pelo cálculo da AoI, definido-se ainda se a métrica de interesse é a AoI média ou a AoI de pico média.

A AoI média para uma fonte i é calculada pelo método das áreas, conforme [Kaul et al. 2012], sendo dada pela Eq. 3.

$$\langle \Delta \rangle_i = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \Delta(t) dt = \frac{\sum_{j=1}^{J_i} Q_i^j}{d_i^{J_i} - s_i^1} \quad (3)$$

As áreas Q_i^j são dadas por $Q_i^j = Y_i^j T_i^j + Y_i^{j-1} T_i^j / 2$, onde $Y_i^j = s_i^j - s_i^{j-1}$ é o tempo entre a geração de pacotes para a fonte i e $T_i^j = d_i^j - s_i^j$ é o tempo de sistema para o pacote (i, j) . O termo J_i representa o índice do último pacote da fonte i que completou o serviço, indicando também o final da simulação para a fonte i .

A AoI de pico média para a fonte i , por sua vez, é calculada através da Eq. 4, onde $A_i^j = Y_i^j + T_i^j$.

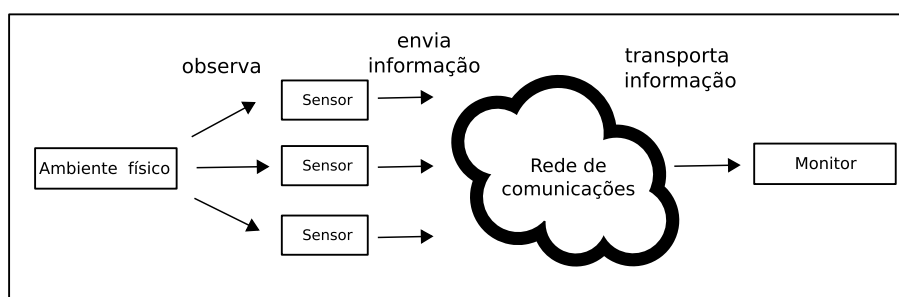
Antes do início da simulação, deve-se definir a quantidade de pacotes que se deseja simular. Essa quantidade tem um impacto direto na precisão da simulação, a qual é fornecida juntamente com as métricas estimadas. Deve-se definir, ainda, para quais nós da rede deseja-se armazenar os dados gerados, sendo que cada nó armazena a informação

referente aos pacotes que por ali tráfegaram, conforme a lista apresentada anteriormente. Ao final da simulação, um arquivo com os dados do experimento é armazenado em uma pasta específica, estando disponível para maiores análises. Na sequência, esse arquivo é enviado para uma função que realiza o processamento dos dados, retornando os valores da AoI média ou AoI de pico para cada uma das fontes.

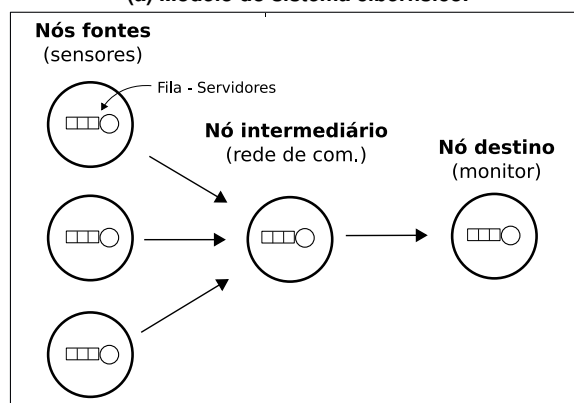
$$\langle \Delta^p \rangle_i = \frac{\sum_{j=1}^{J^i} A_i^j}{J^i} \quad (4)$$

3.2. Caso de uso

A Fig. 2 exemplifica um CPS de monitoramento e o seu correspondente modelo computacional. Nesse CPS (Fig. 2a), sensores monitoram o ambiente e enviam atualizações periódicas para um monitor, por meio uma rede de comunicações. O objetivo é estimar a AoI vista pelo monitor para cada uma das fontes em função dos demais parâmetros do sistema. Para isso, o modelo computacional (Fig. 2b), instancia um grafo direcionado representando uma rede de filas.



(a) Modelo do sistema ciberfísico.



(b) Modelo computacional.

Figura 2. Modelo do sistema ciberfísico em estudo e grafo direcionado representando o modelo computacional para a simulação.

Ressalta-se que o modelo de transmissão da rede de comunicações deve ser definido pelo usuário, assim como qualquer outro componente do sistema. Essa modelagem apresenta-se bastante flexível na ferramenta, uma vez que as funções de tempo de serviço podem ser definidas livremente através de código Python. Uma vez instanciado o grafo e definidos os parâmetros de cada uma das filas, define-se a quantidade de pacotes que serão gerados pelas fontes, passando-se então para o início da simulação. Ao final da

mesma, o sistema retornará para cada um dos sensores as estimativas para a AoI média e para a AoI de pico, bem como a precisão relacionada.

3.3. Precisão dos resultados

Um elemento importante para avaliar a qualidade da implementação e o modelo computacional usado como base, torna-se necessária uma análise estatística da precisão dos resultados. Para esse objetivo, o referido modelo é analisado como um método *Monte Carlo* de simulação. Dessa maneira, o resultado das simulações é sempre acompanhado de um índice de precisão, o qual é calculado pela raiz do erro quadrático médio (REQM) da estimativa obtida. Uma forma de flexibilizar essa precisão é aumentar a quantidade de pacotes simulados, um critério que depende de outros fatores, tais como a variância da estimativa da AoI. Maiores detalhes sobre os critérios e detalhes da análise de erros podem ser encontrados em [Prandel and Barreto 2021].

3.4. Funcionalidades

Conforme apresentado nas subseções anteriores, a ferramenta de simulação entrega como funcionalidades duas métricas principais:

- AoI média, para uma ou mais fontes.
- AoI de pico média, para uma ou mais fontes.
- A precisão dos resultados em termos da REQM.

A ferramenta ainda fornece outros indicadores complementares, os quais são relevantes no estudo da AoI em sistemas ciberfísicos. Esses indicadores são:

- Quantidade de pacotes descartados devido ao regime de serviço, capacidade da fila ou técnica de gerenciamento de pacotes.
- Quantidade de pacotes obsoletos¹ entregues ao monitor.

4. Repositório e manuais

O código fonte da presente ferramenta encontra-se disponível na plataforma *GitHub*, sendo acessado através da URL <https://github.com/pprandel/aoi-simulator>. Na página inicial desse projeto, estão as instruções detalhadas de como instalar e utilizar a ferramenta, além de um link para um vídeo explicativo.

5. Demonstração da ferramenta

A demonstração deste trabalho, por ocasião do Salão de Ferramentas do SBRC 2022, necessita apenas do compartilhamento de tela dos autores, os quais farão uma demonstração de como utilizá-la, apresentando as principais funcionalidades disponíveis. O tempo máximo necessário para essa atividade é estimado em 20 minutos.

6. Conclusão e trabalhos futuros

Este trabalho propõe uma ferramenta para a avaliação da *Age of Information* (AoI) através da simulação de sistemas ciberfísicos, visando principalmente as atividades de otimização e avaliação de desempenho. Como limitação, a ferramenta não possui uma interface

¹Um pacote é considerado obsoleto quando não traz uma informação mais atualizada do que a já disponível no monitor.

gráfica para a sua utilização, necessitando da criação de um *script* para produzir resultados, o que exige um certo nível de conhecimento em programação.

Como próximos passos, sugere-se a implementação de mais técnicas de otimização da AoI, como por exemplo as técnicas de gerenciamento de pacotes já publicadas na literatura. Sugere-se, ainda, a implementação de outras métricas derivadas da AoI além das já existentes (AoI média e AoI de pico).

Referências

- Bedewy, A. M., Sun, Y., and Shroff, N. B. (2017). Age-optimal information updates in multihop networks. *2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, pages 576–580.
- Bedewy, A. M., Sun, Y., and Shroff, N. B. (2019). 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.
- Inoue, Y., Masuyama, H., Takine, T., and Tanaka, T. (2019). A general formula for the stationary distribution of the age of information and its application to single-server queues. *IEEE Transactions on Information Theory*, 65(12):8305–8324.
- Jordon, D. (2016). Queueing-tool: A network simulator. <https://queueing-tool.readthedocs.io/en/latest/index.html>.
- Kaul, S., Yates, R., and Gruteser, M. (2012). Real-time status: How often should one update? In *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*, pages 2731–2735.
- Moltafet, M., Leinonen, M., and Codreanu, M. (2020). On the age of information in multi-source queueing models. *IEEE Transactions on Communications*, 68(8):5003–5017.
- Pappas, N., Gunnarsson, J., Kratz, L., Kountouris, M., and Angelakis, V. (2015). Age of information of multiple sources with queue management. In *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 5935–5940.
- 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. (2018). Status updates through networks of parallel servers. In *2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, pages 2281–2285.
- Yates, R. D. and Kaul, S. K. (2019). The age of information: Real-time status updating by multiple sources. *IEEE Transactions on Information Theory*, 65(3):1807–1827.
- 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.