

Otimização do Consumo Energético em Sistemas de Controle sem Fio Através de Controle Preditivo e Redundância Incremental

Ana Lúcia Vieira Iaremczuk, Guilherme Luiz Moritz, Richard Demo Souza e Glauber Brante

Resumo— Em sistemas de controle via rede sem fio, controle e comunicação não podem ser considerados individualmente. Os benefícios da concepção conjunta para atender aos requisitos de URLLC (*Ultra-Reliable Low Latency Communication*) já demonstraram que é possível melhorar o consumo e aumentar o tráfego de informação ao mesmo tempo através do uso de controle preditivo em pacotes. Este consumo é reduzido ainda mais quando HARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*) é aplicado. Neste trabalho, ambas as técnicas serão empregadas, levando em conta a comunicação via pacotes curtos, para a obtenção de um número ótimo de retransmissões e comandos de controle preditivo, para uma melhor eficiência energética.

Palavras-Chave— Sistemas de controle, Redes sem fio, Pacotes curtos.

Abstract— In wireless networked control systems, control and communication should not be considered independently. The co-design benefits for meeting the URLLC (*Ultra-Reliable Low Latency Communication*) requirements have already demonstrated that it is possible to improve resource utilization while increasing information traffic through the use of PPC (*Packetized Predictive Control*). This consumption is further reduced when HARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*) is applied. In this work, both techniques are applied, whereas supporting short packets communication, to obtain an optimum number of retransmissions and predictive control commands, aiming for better energy efficiency.

Keywords— Control systems, Wireless networks, Short packets.

I. INTRODUÇÃO

Um sistema de controle via rede sem fio (*Wireless Networked Control System* - WNCS) consiste em um conjunto de sensores, controladores e atuadores que interagem através de uma rede sem fio, em vez das convencionais redes ponto-a-ponto cabeadas. A sua utilização traz vários benefícios, como flexibilidade, redução dos custos de instalação e manutenção, e melhoria na segurança, o que têm tornado esta uma tecnologia fundamental para aplicações em sistemas de controle críticos, uma vez que estes utilizam controle em tempo real de sistemas físicos através da rede. Este é o caso de muitas aplicações, como por exemplo, sistemas de controle veiculares, aviônicos, de gestão predial, automação industrial, além da Indústria 4.0 [1]. Além disso, o número de dispositivos conectados à rede

é crescente, estimando-se que até 2025 estes sejam 5 bilhões [2], dando espaço a novas oportunidades.

No entanto, o uso de redes sem fio em sistemas de controle acarreta um atraso e uma probabilidade de erro de mensagem a cada transmissão, diferentemente dos sistemas convencionais de controle, que supõem uma entrega instantânea e uma confiabilidade extremamente elevada. Falhas de transmissão ou atraso no envio impactam diretamente no desempenho de um sistema, podendo gerar perdas econômicas ou até mesmo riscos à segurança, especialmente nos de comunicação crítica [3], que demandam alta confiabilidade com uma baixa latência, motivando o estudo deste tipo de comunicação, denominado URLLC (*Ultra-Reliable Low Latency Communication*).

De acordo com a teoria clássica, é possível realizar uma comunicação confiável em um canal ruidoso através da utilização de um código corretor de erro, desde que o comprimento seja grande o suficiente [4]. Devido à restrição de latência, essa teoria não é aplicável à URLLC, uma vez que o número de usos de canal é reduzido, tornando-a desafiadora [5]. Outro complicador é o tipo de tráfego gerado na comunicação entre os componentes presentes nos WNCSs, na forma de pacotes curtos [6]. Ainda, em [7] os autores demonstram a necessidade de realizar um projeto conjunto dos sistemas de controle e comunicação, assim como [1], que a apresenta a interação entre variáveis de ambos, como amostragem, perda de pacotes, atraso e consumo, o que motiva sua sintonia em conjunto.

Em um WNCS o objetivo principal é transmitir uma ação de controle, ao invés de entregar um fluxo de bits. Com este objetivo, [8] emprega o Controle Preditivo em Pacotes (*Packetized Predictive Control* - PPC), método em que o controlador, baseado no estado da planta, além do comando de controle atual, também prevê e transmite comandos futuros, do controle preditivo, então armazenados em um *buffer*. Desta forma, habilita a operação do atuador mesmo que ocorra uma falha na transmissão, por meio do uso da sequência de comandos anteriormente enviada.

Com esta estratégia, os autores de [8] mostram que é possível aumentar o tráfego na rede sem fio e, ao mesmo tempo, reduzir a utilização de recursos através de uma otimização do comprimento de comandos de controle preditivos. Isto contraria a suposição mais óbvia de que um aumento das demandas da comunicação resulta, inevitavelmente, em um aumento no consumo.

Em continuidade aos trabalhos desenvolvidos por [7] e [8], os autores em [9] oferecem uma relevante contribuição em relação à redução do consumo dos recursos sem fio ao empre-

gar a técnica de *Hybrid Automatic Repeat reQuest* - HARQ, anteriormente avaliada no contexto de URLLC por [10]. No método proposto, com a possibilidade de uma retransmissão em caso de erro (detectado através de uma requisição enviada pelo decodificador), apenas uma porção dos usos de canal disponíveis é empregada na primeira tentativa de envio. No caso de uma transmissão bem sucedida, o transmissor é desligado pelo restante do intervalo, promovendo uma economia de energia. Apenas no caso de uma falha na transmissão, ou no recebimento de uma requisição de retransmissão, a totalidade de usos de canal é empregada. O resultado, considerando o comprimento ótimo de comandos de controle preditivos neste modelo, foi uma significativa redução de até 45% no consumo de recursos.

Apesar da economia obtida em [9], o estudo se limita a uma retransmissão, não avaliando se o ganho poderia ser maior ao aumentar essa quantidade. Desta forma, este artigo endereça a questão sobre qual seria o número ótimo de tentativas de transmissões para se obter o mais baixo consumo. Ainda, demonstra que para diferentes quantidades de retransmissões existe sempre um comprimento ótimo de comandos de controle preditivos. Dentro da proposta que será detalhada a seguir, foi possível obter uma redução de 52,2% em relação ao valor obtido por [8], e 13,3% sobre o melhor consumo obtido por [9] para o comprimento de comando de controle ótimo.

O restante deste artigo está organizado conforme descrito a seguir: A Seção II detalha o modelo do sistema. Na Seção III, é apresentada a formulação do problema. A Seção IV descreve o método proposto. Na Seção V, são mostrados os resultados numéricos. Finalmente, a Seção VI conclui o artigo.

II. MODELO DO SISTEMA

O modelo em questão consiste em um sistema que utiliza PPC, em que, com base nas informações lidas por um sensor a respeito da saída atual da planta, um controlador calcula uma sequência de comandos de controle, contendo um comprimento de predição de K comandos, dada por

$$\mathbf{U}(i) = [u_1(i), u_2(i), \dots, u_K(i)], \quad (1)$$

em que i é o índice do intervalo de tempo, $u_1(i)$ é o comando de controle para o intervalo atual e $[u_2(i), \dots, u_K(i)]$ são os comandos preditivos, para intervalos futuros.

O canal de comunicação entre controlador e decodificador é sem fio, sendo este um WNCS, e para ser capaz de armazenar comandos de controle futuros, um *buffer* é ligado ao atuador, como pode ser observado na Figura 1. O conjunto

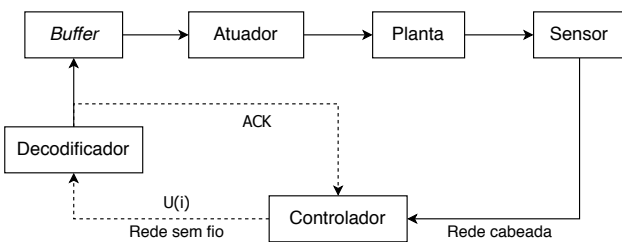


Fig. 1. Modelo do sistema de controle, em que o controlador e o atuador se comunicam através de uma rede sem fio.

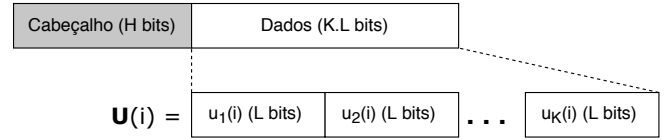


Fig. 2. Estrutura do pacote contendo a sequência de comandos de controle.

decodificador-*buffer* é responsável por fornecer os comandos recebidos ao atuador, através de uma ligação cabeada, a cada intervalo de tempo.

Uma mensagem requisitando ou não uma retransmissão (ACK/NACK) é enviada pelo decodificador ao controlador através do canal sem fio a cada envio. Em [9], com a possibilidade de apenas uma retransmissão, somente uma mensagem de retorno era necessária. Com a possibilidade de serem feitos mais envios, para cada z transmissões, haverá $z - 1$ mensagens ACK/NACK, sendo possível identificar se a comunicação foi bem sucedida a cada tentativa. Na última transmissão o retorno não é necessário, uma vez que, na ocorrência de um *outage*, o envio subsequente já será de uma nova sequência $\mathbf{U}(i + 1)$.

Em caso de sucesso, o transmissor é desligado, poupando energia durante o restante do intervalo. Já na situação em que ocorra uma interrupção na comunicação, se houver tempo suficiente, uma nova tentativa é realizada, do contrário, o atuador pode fazer uso dos $K - 1$ comandos futuros armazenados, até que se reestabeleça a comunicação, sem que haja uma interrupção no controle.

Cada pacote possui um cabeçalho de H bits e um *payload* definido em função do número de comandos de controle K a serem enviados, sendo seu comprimento total [8]

$$N = H + KL, \quad (2)$$

em que L é o comprimento de cada comando, conforme ilustrado na Figura 2. Nela, pode-se observar que o tamanho do cabeçalho (*metadata*) não é desprezível em comparação aos dados (*payload*), característica dos pacotes curtos [6].

Neste tipo de modelo, conforme sugerido anteriormente, podem ocorrer $K - 1$ perdas de pacotes até que o *buffer* esteja vazio e o atuador não tenha informações sobre o que executar na sequência, ou seja, uma interrupção no controle (*control outage*). Sendo p_e a probabilidade de erro de pacote e assumindo que cada transmissão é independente, para garantir uma determinada probabilidade p_c de interrupção no controle, deve-se obedecer à seguinte inequação [8]

$$p_e \leq p_c^{\frac{1}{K}}. \quad (3)$$

Existe um compromisso entre K e p_e , sendo que ao se escolher um K pequeno, p_c aumenta, uma vez que há menos comandos à disposição quanto a transmissão é interrompida. Por outro lado, um K muito grande eleva a p_e devido à maior taxa de transmissão necessária, influenciando negativamente no p_c . Desta maneira, é necessário encontrar um valor ótimo para o comprimento de comandos de controle.

Tratando-se de pacotes curtos, a capacidade de canal de Shannon não pode ser aplicada [11], e é necessário adotar o equacionamento proposto por [6] para encontrar a taxa

máxima de transmissão R em função do número de usos de canal n e da probabilidade de erro do pacote p_e

$$R(n, p_e) \approx C - \sqrt{\frac{V}{n}} Q^{-1}(p_e) + \frac{\log_2 n}{2n}, \quad (4)$$

em que

$$C = \log_2(1 + \gamma), \quad (5)$$

$$V = \gamma \frac{2 + \gamma}{(1 + \gamma)^2} (\log_2 e)^2 \approx (\log_2 e)^2. \quad (6)$$

Em (4), (5) e (6), C é a capacidade do canal de Shannon com banda unitária, γ corresponde à relação sinal-ruído (SNR), V é a dispersão do canal e $Q(x)$ é a probabilidade de uma variável aleatória com distribuição normal ser maior que x .

Sendo P a potência de transmissão, G o ganho do canal, N_0 a densidade espectral do ruído branco aditivo e B a largura de banda, a SNR no decodificador é dada por

$$\gamma = \frac{PG}{N_0 B}. \quad (7)$$

Além disso, o número de usos de canal, uso de recurso tempo-frequência em cada pacote, ou comprimento do pacote [6], pode ser descrito por

$$n = \frac{N}{R(n, p_e)}, \quad (8)$$

em que $n = B.T$, sendo T a latência máxima admitida pelo sistema de controle, variando entre 1 e n_{\max} , obedecendo à restrição de latência imposta pela sensibilidade ao atraso, característica deste tipo de sistema.

A probabilidade de erro de pacote pode ser calculada por

$$p_e \approx Q\left(\frac{nC - N + \frac{\log_2 n}{2}}{\sqrt{nV}}\right), \quad (9)$$

obtida pela combinação de (8) e (4).

III. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Este trabalho tem como objetivo diminuir o consumo energético envolvido na transmissão de um pacote. O método proposto consiste em aplicar HARQ de redundância incremental, dividindo os usos de canal entre Z transmissões e $Z - 1$ mensagens ACK, ou seja

$$n_{\max} = n_{ca} + (Z - 1) \cdot n_{ack}, \quad (10)$$

em que n_{\max} é o número máximo de usos de canal respeitando T , n_{ca} são os usos de canal disponíveis para as Z transmissões e n_{ack} são símbolos utilizados pela mensagem ACK.

Cada tentativa de transmissão z utiliza apenas uma porção dos usos de canal n_{ca} , que corresponde a

$$n_z = \lceil \alpha_z n_{ca} \rceil, \quad (11)$$

sendo α_z uma constante definida entre 0 e 1, que representa a porcentagem de n_{ca} empregada para cada tentativa de transmissão $z \in \{1, \dots, Z - 1\}$, em que $\lceil x \rceil$ é o menor inteiro maior que x . Na última tentativa de envio $z = Z$, sendo esta a última oportunidade de transmissão dentro do intervalo

T , utilizam-se todos os n_z usos de canal remanescentes. Consequentemente, pode-se afirmar que $\sum_{z=1}^Z \alpha_z = 1$.

A estratégia para reduzir a utilização dos recursos da comunicação sem fio consiste em desligar o transmissor ao receber um ACK informando que a decodificação da z -ésima mensagem foi realizada com sucesso, poupando a energia por uma parcela de T , correspondente ao restante do intervalo. O mecanismo de transmissão está ilustrado na Figura 3, tomando como exemplo um número máximo de transmissões $Z = 3$.

A proporção α_z precisa ser selecionada estrategicamente para que a primeira transmissão tenha um *outage* controlado, de forma a ser complementado pelas rodadas subsequentes de redundância incremental, tal que a chance de sucesso na primeira transmissão seja relativamente grande, de modo a aumentar a probabilidade de não precisar das demais, mas não a ponto de exigir o consumo de quase todos os n_{ca} usos do canal.

Pela combinação de (5), (7) e (9), isolando P e utilizando o valor de n_{ca} no lugar de n , é possível obter a potência de transmissão do pacote P_{ir} demandada para atender à probabilidade de interrupção no controle p_e , ou seja, $p_e = p_c^{\frac{1}{Z}}$.

Vale ressaltar que P_{ir} neste método é maior do que em [8], que não previa envios de mensagem ACK, pois os usos de canal n_{ack} de cada uma das $Z - 1$ mensagens precisam ser descontados. Como consequência, quanto maior Z , maior P_{ir} .

A partir de P_{ir} , podem-se encontrar os valores de C , V e γ , com (5), (6) e (7), respectivamente, necessários para o cálculo da probabilidade de erro de pacote $p_{e,z}$ através de (9), considerando n como os usos de canal utilizados até o z -iésimo envio. Essa é a probabilidade com a qual o decodificador solicitará uma nova transmissão.

Além do erro de pacote, assume-se que há uma probabilidade p_{ack} de que o ACK não seja recebido pelo controlador, mesmo quando o pacote seja recebido com sucesso. Neste caso, um novo envio é efetuado sem que haja uma solicitação por parte do decodificador.

O consumo energético realizado a cada tentativa de transmissão z pode ser obtido por

$$E_z = \frac{P_{ir} n_z}{B}. \quad (12)$$

Também é necessário considerar a energia consumida pela mensagem ACK

$$E_{ack} = \frac{P_{ack} n_{ack}}{B}, \quad (13)$$

em que P_{ack} é a sua potência de transmissão.

A energia total da transmissão E_{ir} é calculada pela a combinação do consumo em diferentes situações com suas probabilidades de ocorrência. Estas podem ser elencadas como:

- Sucesso no recebimento do pacote e do ACK, com probabilidade $(1 - p_{e,z})(1 - p_{ack})$;
- Erro no recebimento do pacote, com probabilidade $p_{e,z}$;
- Falha no recebimento do ACK, com probabilidade $(1 - p_{e,z})p_{ack}$.

Os dois últimos casos irão resultar em um novo envio, sujeito às três situações supracitadas, em cascata, sucessivamente, até que seja atingido o limite de transmissões Z , em que a totalidade de usos de canal é empregada.

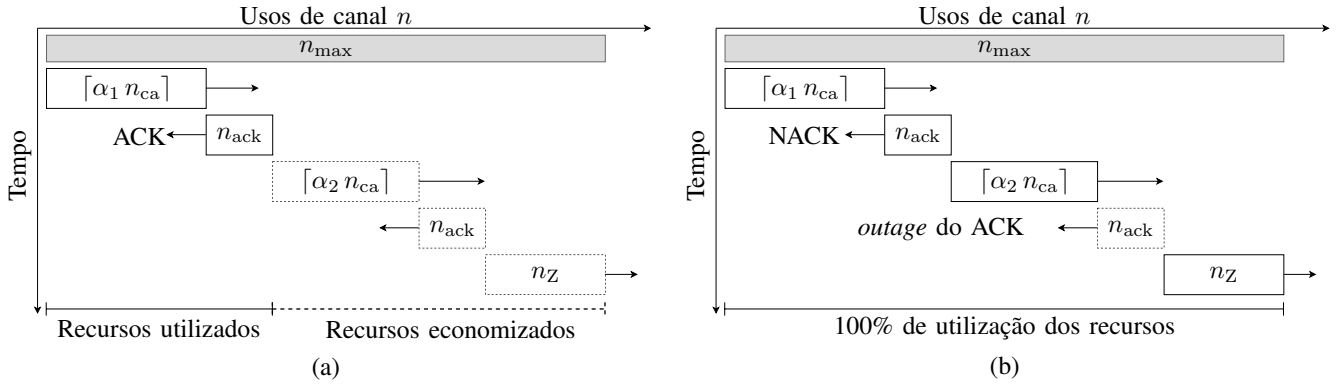


Fig. 3. Método para otimização do uso de recursos, empregando redundância incremental, em que cada tentativa de envio utiliza $\lceil \alpha_z n_{ca} \rceil$ usos de canal, para um número máximo de transmissões $Z = 3$: (a) economia de recursos após sucesso na primeira transmissão; (b) um problema na decodificação do pacote com uma nova solicitação através de um NACK, seguido de um problema de recebimento do ACK, resultando em 100% de utilização dos recursos.

Conhecidas as componentes energéticas correspondentes a cada tentativa de envio z , bem como a combinação de probabilidades para cada evento, é possível obter a energia total consumida E_{ir} , que pode ser escrita como

$$E_{ir}(Z) = \sum_{k=1}^Z \left(E_k \cdot \prod_{z=0}^{k-1} [p_{e,z} + (1 - p_{e,z})p_{ack}] \right) + \sum_{k=1}^{Z-1} \left(E_{ack} \cdot \prod_{z=0}^{k-1} [p_{e,z} + (1 - p_{e,z})p_{ack}] \right), \quad (14)$$

considerando $p_{e,0} = 1$, correspondente à probabilidade de erro quando nenhuma transmissão é realizada.

O problema de otimização proposto pode ser definido como

$$\begin{aligned} \min_{K,n,Z} \quad & E_{ir}, \\ \text{s.t.} \quad & p_e = Q \left(\frac{nC - N + \frac{\log_2 n}{2}}{\sqrt{nV}} \right) \leq p_c^{\frac{1}{K}}, \\ & n_{ca} = n_{max} - (Z - 1) \cdot n_{ack}, \\ & 1 \leq n \leq n_{ca}, \end{aligned} \quad (15)$$

em que a busca pelos valores ótimos é realizada a partir da arbitragem de diferentes proporções α_z , influenciando diretamente em E_{ir} através de E_z e $p_{e,z}$. Vale notar que, sendo n o número de usos de canal utilizados até o z -ésimo envio, este pode assumir valores até n_{ca} .

Neste caso, a variável Z é incorporada ao problema de otimização utilizado por [8] e [9]. Desta forma, além de um comprimento de comandos de controle preditivos K , também é encontrado um valor ótimo para o número máximo de transmissões. Esta formulação é equivalente a empregada em [8], adotando-se $Z = 1$, e [9], para $Z = 2$.

Em [8], para um caso sem HARQ, foram obtidas equações para os valores ótimos de potência de transmissão e usos do canal, P^* e n^* , respectivamente, sendo

$$P^* = \left(2^{\frac{1}{n^*}} \sqrt{n^*} Q^{-1} \left(p_c^{\frac{1}{K}} \right) \log_2(e) + N - \frac{1}{2} \log_2(n^*) - 1 \right) \frac{N_0 B}{G}, \quad (16)$$

$$n^* = n_{max}. \quad (17)$$

Como estratégia para redução do consumo energético, a utilização de HARQ em [9], com uma única retransmissão, resultou em uma melhora de até 45%, e, conforme será apresentado a seguir, é possível obter valores ainda mais satisfatórios através do uso de um número maior de retransmissões.

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção, os resultados do método proposto são analisados em relação aos utilizados em [8] e [9]. Foram considerados os mesmos valores para as variáveis, para uma melhor avaliação dos ganhos do modelo, sendo $N_0 = -204$ dBW/Hz, ganho do canal de $G = -80$ dB, um cabeçalho do pacote de $H = 32$ bits, comprimento do comando de controle de $L = 8$ bits, $n_{max} = 250$, $n_{ack} = 10$ símbolos, P_{ack} é igual ao valor de P_{ir} quando $K = 1$, probabilidade almejada de *control outage* $p_c = 10^{-9}$ e uma conservadora¹ $p_{e,ack} = 10^{-2}$. O número de transmissões Z variou entre 2 e 7, enquanto que o número de comandos de controle K foi avaliado de 1 a 10. Para as proporções, na primeira transmissão foi estabelecido um valor mínimo de $\alpha_1 = 0,4$ para garantir um mínimo de 100 usos do canal na primeira tentativa.

A Figura 4 exhibe o consumo do recurso sem fio em relação a K , para diferentes valores de Z . Pode-se observar que o comprimento da predição de controle ótimo não é influenciado pelo número de retransmissões escolhidas, sendo $K = 2$.

Outra observação importante é a diferença no consumo energético. Para melhor ilustrar, a Figura 5 exhibe um gráfico do consumo E_{ir} em relação a Z . Para o comprimento de comandos de controle ótimo, a economia chega a 13,3% quando o número máximo de transmissões aumenta de $Z = 2$ para $Z = 4$, demonstrando que de fato a estratégia utilizada em [9] pode ser aprimorada através do uso de um número maior de retransmissões, proporcionando um menor gasto energético,

¹O equacionamento para pacotes curtos em (3) não é preciso para tamanhos de bloco muito pequenos. No entanto, sendo a mensagem ACK composta por apenas um bit de informação, para $K = 1$ e $n_{ack} = 10$, a taxa de dados é muito baixa, o que faz o *link* naturalmente robusto. Desta forma, optou-se por utilizar um valor conservador $p_{e,ack} = 10^{-2}$ no lugar do calculado.

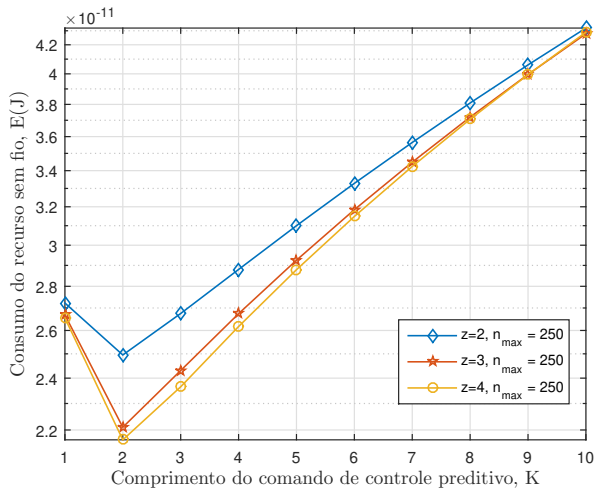


Fig. 4. Consumo versus K para diferentes valores de Z , com $n_{\max} = 250$, demonstrando a existência de um ponto ótimo para o comprimento de controle preditivo e a redução no gasto energético com o aumento de Z .

não só no ponto ótimo, mas para todos os comprimentos de controle avaliados. Se comparada a [8], essa economia é ainda mais expressiva, alcançando 52,2%. Vale ressaltar que para as condições analisadas, $Z = 4$ é o valor ótimo para número máximo de transmissões.

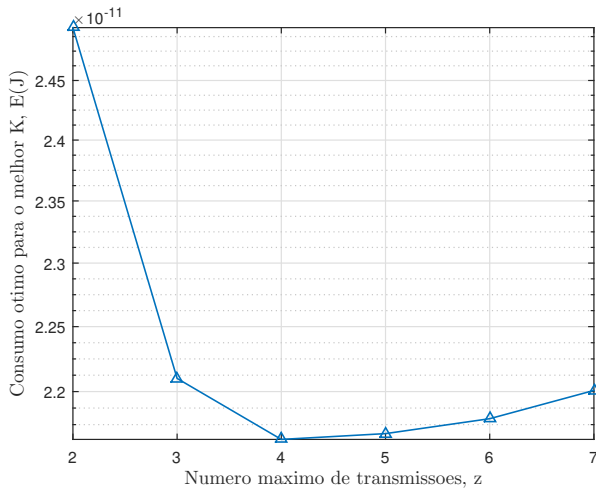


Fig. 5. Consumo versus Z para $K = 2$, com $n_{\max} = 250$, evidenciando o número máximo de transmissões ótimo, $Z = 4$.

A Figura 6 evidencia que a estratégia adotada consiste em utilizar aproximadamente metade de n_{ca} na primeira transmissão e poupar o restante, independentemente de Z . Além disso, o aumento de diversidade proporcionado por um Z elevado faz com que a *outage* possa ser controlada com um número menor de usos de canal. Ainda, observa-se que as retransmissões subsequentes utilizam uma quantidade reduzida de usos de canal, em torno de 1,6% de n_{ca} , apenas para complementar o envio inicial.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um método de alocação de recursos que otimiza o gasto energético em sistemas de controle

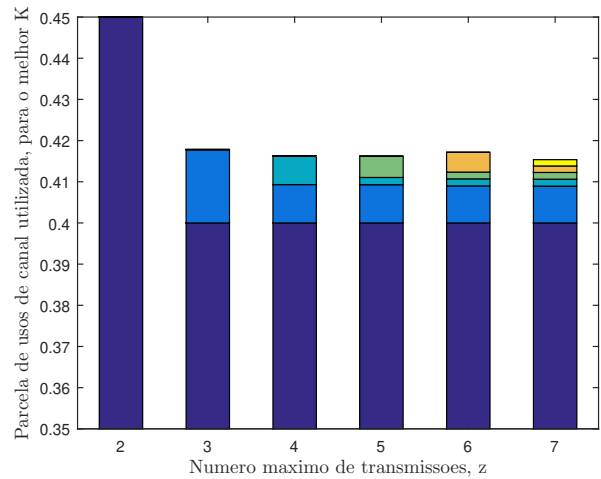


Fig. 6. Proporção α_z aplicada sobre n_{ca} a cada transmissão Z de 1 a $Z - 1$, para o comprimento ótimo de comandos de controle preditivo.

via redes sem fio que se baseia em controle preditivo em pacotes e HARQ de redundância incremental. Para as condições estipuladas, encontrou-se uma quantidade ótima de comandos de controle $K = 2$, independentemente da quantidade de transmissões, um valor ótimo de $Z = 4$ transmissões ao máximo, em que se encontra o melhor consumo. Isso se traduz em uma redução de 13,3%, quando comparando a HARQ com uma única retransmissão [9], e uma economia de 52,2% em relação a [8], em que não foi aplicado HARQ.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Park, S. Coleri Ergen, C. Fischione, C. Lu and K. H. Johansson, "Wireless Network Design for Control Systems: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 978-1013, 2018.
- [2] Ericsson, "Cellular networks for Massive IoT", *White Paper*, January 2020.
- [3] "Guest Editorial Special Section on New Perspectives on Wireless Communications in Automation: From Industrial Monitoring and Control to Cyber-Physical Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 3, pp. 1393-1397, June 2017.
- [4] C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication, Part I, Part II," *Bell Sys. Tech. J.*, vol. 27, 1948, pp. 623–56.
- [5] P. Popovski et al., "Wireless Access for Ultra-Reliable Low-Latency Communication: Principles and Building Blocks," in *IEEE Network*, vol. 32, no. 2, pp. 16-23, March-April 2018.
- [6] G. Durisi, T. Koch, and P. Popovski, "Toward massive, ultrareliable, and low-latency wireless communication with short packets," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 9, pp. 1711–1726, 2016.
- [7] G. Zhao, M. A. Imran, Z. Pang, Z. Chen and L. Li, "Toward Real-Time Control in Future Wireless Networks: Communication-Control Co-Design," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 2, pp. 138-144, February 2019.
- [8] X. Tong, G. Zhao, M. A. Imran, Z. Pang and Z. Chen, "Minimizing Wireless Resource Consumption for Packetized Predictive Control in Real-Time Cyber Physical Systems," *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Kansas City, MO, 2018, pp. 1-6.
- [9] F. E. da Silva, A. L. V. Iaremczuk, R. D. Souza, G. Brante, G. L. Moritz and S. Hussain, "Hybrid ARQ in Wireless Packetized Predictive Control," in *IEEE Sensors Letters*, vol. 4, no. 5, pp. 1-4, May 2020.
- [10] J. P. Battistella Nadas, O. Onireti, R. D. Souza, H. Alves, G. Brante and M. A. Imran, "Performance Analysis of Hybrid ARQ for Ultra-Reliable Low Latency Communications," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 9, pp. 3521-3531, May, 2019.
- [11] A. Goldsmith, *Wireless Commun.* USA: Cambridge Univ. Press, 2005.