



Estudo e Implementação de um Sistema de Comunicação Molecular em Escala Macroscópica

Vitor Kussler Veronese e Paulo Cardieri
FEEC - UNICAMP

1 Introdução

O avanço observado nos últimos anos nas áreas de ciências biológicas e de nano-tecnologia tem motivado o estudo do uso de bio-nanomáquinas ou do controle de moléculas para a realização de tarefas em nível molecular [1,2]. Dentre essas tarefas, podemos citar a entrega controlada de medicamentos a órgãos dentro do corpo humano e a detecção de agentes externos malignos no corpo. Uma outra área de aplicação que tem atraído atenção é o da transmissão de informação em ambientes onde o uso de ondas eletromagnéticas é inapropriado.

O estudo de modelos matemáticos para a descrição da comunicação molecular tem sido acompanhado por trabalhos práticos, por meio de experimentos em laboratório em escala macroscópica [3–5]. Nesses trabalhos práticos, são utilizados aparatos com dimensões muito maiores do que aquelas de células ou de órgãos biológicos, com o objetivo de entender os processos envolvidos na comunicação usando moléculas e de aperfeiçoar os modelos matemáticos. Tais experimentos tem se mostrado essenciais para avaliar o uso da comunicação molecular em situações em que a comunicação convencional não é adequada. De fato, a comunicação molecular é vista com uma alternativa aos sistemas de comunicação convencionais, já sendo estudada como parte integrante dos sistemas de comunicação sem fio de sexta geração (6G) [6].

O presente projeto visou a construção e o estudo de um aparato experimental de comunicação molecular em escala macroscópica. Construindo-se um sistema semelhante àquele desenvolvido em [3], onde moléculas são difundidas no ar em uma das pontas do enlace, e sentidas por um sensor na outra ponta do enlace, localizado a alguns metros de distância do difusor de moléculas.

2 Especificação do Sistema de Comunicação

A técnica de comunicação molecular macroscópica estudada é baseado em um aparato montado por Farsad et al. [3,7]. Consiste basicamente em um transmissor implementado usando um borrifador (*sprayer*) controlável, que injeta moléculas portadoras no ar, e em um receptor construído por

meio de sensores das moléculas da portadora. O borrifador e os sensores são controlados por micro-controladores. O controle da comunicação é, então, realizado por meio do acionamento do borrifador para a liberação das moléculas portadoras de acordo com o bit de informação a ser transmitido.

Figura 1 mostra o diagrama de blocos do aparato construído. A descrição de cada um dos blocos

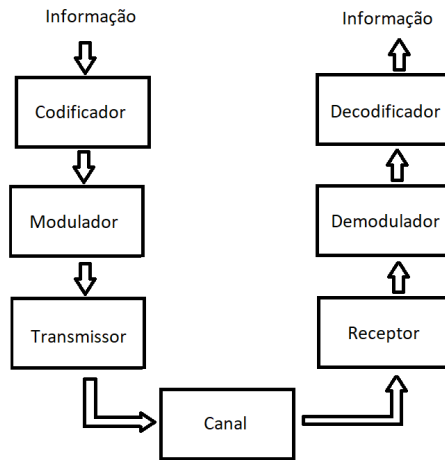


Figura 1: Estrutura de blocos do sistema de comunicação.

que aparecem nessa figura é tratada a seguir.

2.1 Transmissor e Receptor

Como moléculas portadora, escolheu-se o álcool, pela facilidade de manipulação. O transmissor foi implementado usando um borrifador (*sprayer*) elétrico, enquanto o detector foi construído usando um sensor de concentração de álcool MQ-3.

2.2 Canal

O ambiente de propagação utilizado nos experimentos foi o espaço aberto. Nessa situação, a propagação de sinais envolve basicamente o mecanismo *Random Walk*, que é o modo aleatório com que moléculas se propagam no ar. Foi também testado o canal com um fluxo forçado de ar, criado por um ventilador, forçando um sentido de deslocamento das moléculas e aumentando a velocidade de deslocamento da moléculas. Nesse caso, o deslocamento é dito ser do tipo *Random Walk with drift*.

2.3 Modulador e Demodulador

Empregou-se a técnica *Concentration Shift Keying* (CSK), que consiste em se alterar a quantidade de moléculas emitidas em função do símbolo a ser transmitido. Essa técnica de modulação é inspirada na modulação ASK (*Amplitude Shift Keying*) empregada em sistemas convencionais de comunicação.

2.4 Codificador e Decodificador

Decidiu-se usar transmissão assíncrona, o que eliminou a necessidade de implementar um mecanismo de recuperação de sincronismo, simplificando a comunicação, mas exigindo a introdução de bits de início e fim de mensagem.

Para a transmissão das mensagens, empregou-se um código semelhante ao *IT Alphabet 2*, mostrado na Tabela 1. Essa codificação possui baixa concentração de “1s” em comparação a “0s”, que

Letra	Código	Letra	Código	Letra	Código
A	10000	J	11110	S	00011
B	01111	K	11010	T	01001
C	11100	L	01110	U	10010
D	00101	M	01010	V	10110
E	00001	N	10100	W	10111
F	10011	O	11000	X	11101
G	11001	P	00111	Y	10001
H	10101	Q	01101	Z	01011
I	00110	R	01100		00100

Tabela 1: Tabela de Codificação utilizada nos experimentos.

reduz o consumo de moléculas e contribui para deixar o meio menos ruidoso.

3 Resultados dos Experimentos

3.1 Resposta impulsiva

Os testes realizados visaram estimar a resposta impulsiva do canal em três condições com relação ao fluxo de ar: (i) sem fluxo forçado, (ii) com fluxo forçado fraco (usando um ventilador fraco) e (iii) com fluxo de grande força (com um ventilador forte). Os resultados médios estão mostrados na Figura 2.

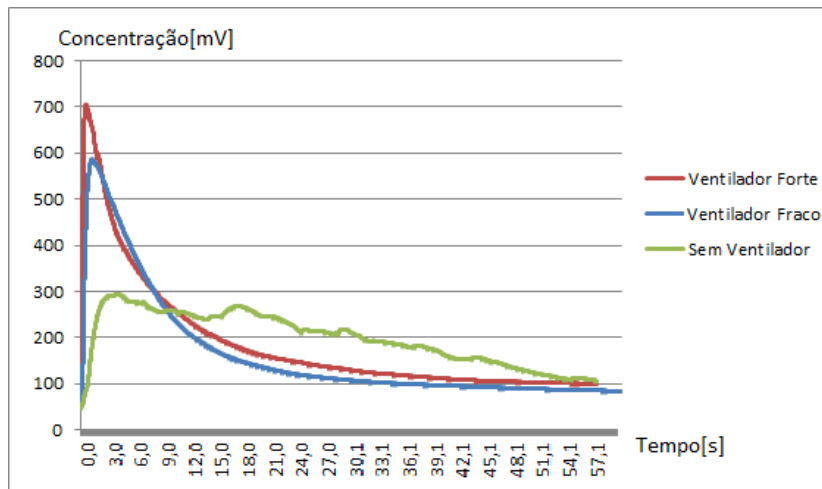


Figura 2: Resposta impulsiva do canal para os casos (i) sem fluxo forçado, (ii) com fluxo forçado fraco (usando um ventilador fraco) e (iii) com fluxo de grande força (com um ventilador forte)

Para o caso sem fluxo de ar, observou-se uma grande variação no formato da resposta impulsiva. Esse resultado era previsto, dado que a única forma de fluxo foi por parte de correntes de vento naturais e o jato resultante da emissão das moléculas pelo borrifador. Pode-se notar o lento caimento da resposta impulsiva, o que acarreta em uma forte interferência intersimbólica, limitando severamente a taxa de transmissão.

Para os testes em que havia um fluxo forçado de ar, foram usados ventiladores de baixa e de alta potência.

Pode ser visto que uma adição no sentido na propagação das moléculas provocou dois efeitos nas respostas impulsivas:

- Diminuição da aleatoriedade do formato da resposta impulsiva, ou seja, as realizações são mais parecidas entre si, indicando maior estabilidade do sistema de comunicação.
- O caimento da resposta impulsiva é mais pronunciado, indicando que uma maior taxa de transmissão pode ser conseguida.

Isso nos mostra que a adição de um fluxo forçado leva a um sistema mais robusto, permitindo uma maior taxa de transmissão. Nota-se que a resposta impulsiva tem um caimento mais pronunciado, o que também permite uma taxa de transmissão mais alta, em nosso caso chegando a 20 bits/minuto.

3.2 Influência da distância entre TX-RX na resposta impulsiva

O objetivo do teste apresentado nessa seção foi o de avaliar o efeito da distância d_{tr} de separação entre TX e RX na resposta impulsiva do canal. A Figura 3 mostra os resultados mais significativos, para distâncias $d_{tr} = 1, 5$ e $7,5$ m.

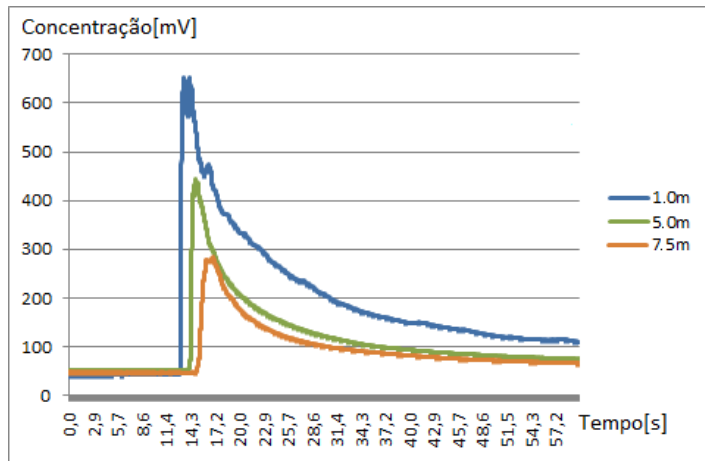


Figura 3: Resposta impulsiva do canal para diferentes distâncias de separação entre TX e RX.

A amplitude da curva da resposta impulsiva (isto é, a integral da curva no intervalo $0 \leq t \leq \infty$) é proporcional ao chamado *ganho* do canal de comunicação, ou seja, à intensidade do sinal que chega ao receptor. Podemos observar claramente que, como esperado, esse ganho diminui com o aumento da distância. Isso indica que grandes distâncias de separação d_{tr} exigirão taxas de transmissão menores, para se garantir uma probabilidade de transmissão com sucesso mínima aceitável.

3.3 Influência da distância de separação na taxa de erro de símbolo

Os resultados obtidos para o teste de taxa de erros estão mostrados na Tabela 2. Observa-se que o aumento da distância leva a uma maior taxa de erros, devido à menor concentração de moléculas que chega ao sensor quando a distância de separação aumenta.

É importante lembrar que o fluxo a grande distâncias já é deveras fraco, de tal forma que os efeitos de *Random Walk* antes apresentados começam a ser um efeito relevante. Com estes fatores,

Distância (m)	1,5	2,0	...	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
Erro (%)	0	0	...	0	0	10	30	40	90

Tabela 2: Taxa de erro de símbolo em função da distância.

o limite da distância de separação entre TX e RX para uma comunicação adequada é provavelmente em torno de 6 metros para nosso caso. Conjecturamos que esse valor pode ser aumentado em um canal do tipo *duto*, que limita a dispersão das moléculas.

4 Considerações Finais

Esse trabalho apresentou resultados de experimentos práticos de um sistema de comunicação molecular em escala macroscópica, empregando moléculas de álcool como portadoras de informação. O limite de taxa de bits obtidos nos nossos experimentos foi semelhante àqueles indicados na literatura empregando aparatos semelhantes. Viu-se pela resposta ao impulso do sistema que essa baixa taxa é diretamente dependente do canal e da interação que as moléculas tem com o mesmo. Para uma maior taxa de transmissão é necessário um maior controle do canal para uma menor dispersão das moléculas de álcool.

O sistema com fluxo de ar forçado testado mostrou bons resultados de como o controle do sistema é possível. Conclui-se assim que a um dos objetivos da comunicação molecular, isto é, o de poder estabelecer um sistema de comunicação em situações em que sistemas tradicionais não podem ser utilizados, pode já estar sendo atingido para alguns casos específicos.

Referências

- [1] T. Nakano, A. W. Eckford, and T. Haraguchi, p. 177–179. Cambridge University Press, 2013.
- [2] T. Nakano, T. Suda, Y. Okaie, M. J. Moore, and A. V. Vasilakos, “Molecular communication among biological nanomachines: A layered architecture and research issues,” *IEEE Transactions on NanoBioscience*, vol. 13, pp. 169–197, Sep. 2014.
- [3] N. Farsad, W. Guo, and A. W. Eckford, “Tabletop molecular communication: Text messages through chemical signals,” *PLOS ONE*, vol. 8, pp. 1–13, 12 2013.
- [4] B. Koo, C. Lee, H. B. Yilmaz, N. Farsad, A. Eckford, and C. Chae, “Molecular mimo: From theory to prototype,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, pp. 600–614, March 2016.
- [5] I. Atthanayake, S. Esfahani, P. Denissenko, I. Guymer, P. J. Thomas, and W. Guo, “Experimental molecular communications in obstacle rich fluids,” in *Proceedings of the 5th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication, NANOCOM ’18*, (New York, NY, USA), pp. 32:1–32:2, ACM, 2018.
- [6] W. Haselmayr, A. Springer, G. Fischer, C. Alexiou, H. Boche, P. A. Hoehner, F. Dressler, and R. Schober, “Integration of Molecular Communications into Future Generation Wireless Networks,” in *1st 6G Wireless Summit*, (Levi, Finland), IEEE, March 2019.
- [7] N. Farsad, *Molecular Communication: From Theory to Practice*. PhD thesis, York University, Toronto, Ontario, Canada, 2015.