



# 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

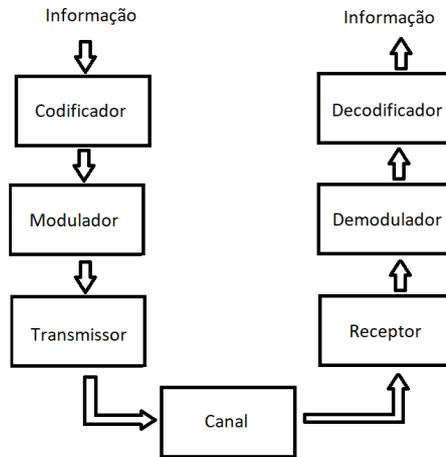


Figura 1: Estrutura de blocos do sistema de comunicação.

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.

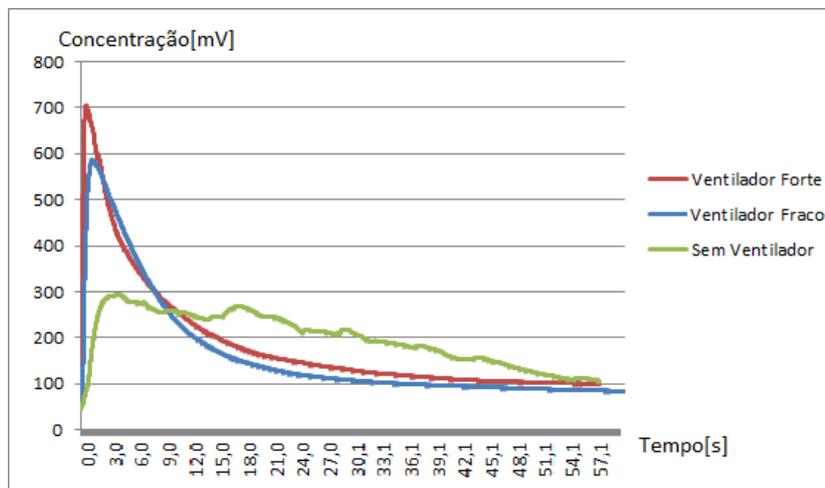


Figura 2: Resposta impulsiva do canal para os casos (i) sem fluxo forçado, (ii) com fluxo forçado fraco (usando um ventilador fraco) e (iii) com fluxo de grande força (com um ventilador forte)

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 decaimento 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.

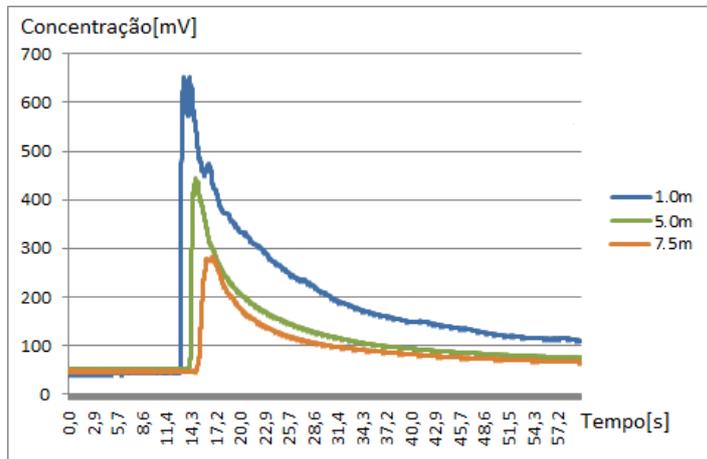


Figura 3: Resposta impulsiva do canal para diferentes distâncias de separação entre TX e RX.

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.