

# NANO E MICROROBÓTICA COM BACTÉRIAS FLAGELADAS

GABRIEL LAGUÁRDIA DE LIMA\*, OMAR PARANAIBA VILELA NETO\*, LUIZ CHAIMOWICS\*, MÁRIO FERNANDO M. CAMPOS\*, UBIRAJARA AGERO BATISTA†, OSCAR NASSIF DE MESQUITA†, PORFÍRIO CABALEIRO CORTIZO‡, ULYSSES GARCIA CASADO LINS§, PEDRO ERNESTO LOPES LEÃO§

\**Departamento de Ciência da Computação  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil*

†*Departamento de Física  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil*

‡*Departamento de Engenharia Eletrônica  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil*

§*Instituto de Microbiologia  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil*

Emails: [laguardia-gabriel@ufmg.br](mailto:laguardia-gabriel@ufmg.br), [omar@dcc.ufmg.br](mailto:omar@dcc.ufmg.br), [chaimo@dcc.ufmg.br](mailto:chaimo@dcc.ufmg.br),  
[mario@dcc.ufmg.br](mailto:mario@dcc.ufmg.br), [bira@fisica.ufmg.br](mailto:bira@fisica.ufmg.br), [mesquita@fisica.ufmg.br](mailto:mesquita@fisica.ufmg.br),  
[porfirio@cpdee.ufmg.br](mailto:porfirio@cpdee.ufmg.br), [ulins@micro.ufrj.br](mailto:ulins@micro.ufrj.br), [pedroll22@hotmail.com](mailto:pedroll22@hotmail.com)

**Abstract**— The great advances in microelectronics and computation provided a significant development of several technology areas. Among these areas we can highlight the robotics. Also, the continuous advancement of the manufacturing techniques for micro and nanoscale has allowed the development of robotic systems in these scales. However, the greatest bottleneck in the miniaturization of robots is the miniaturization of actuators and embedded energy sources required for the movement. Biomotors such as those present in flagellated bacteria, have been seen as one of the most promising propulsion for the realization of these micro and nanorobots. They are advantageous because they are smaller, are able to perform complex movements and convert energy very efficiently. This project focuses on developing computer systems and control apparatus of magnetotactic bacteria in order to conduct research on small scale robotic, targeting different types of future applications such as drugs delivery, biosensors, swarm of small robots, etc.

**Keywords**— Nano and Microrobotics, flagellated bacteria, Planning and Robot Control.

**Resumo**— Os grandes avanços da microeletrônica e, conseqüentemente, da computação propiciaram um significativo desenvolvimento das áreas tecnológicas. Dentre as áreas beneficiadas podemos destacar a robótica. Já o contínuo avanço das técnicas de fabricação em micro e nanoescala tem permitido o desenvolvimento de sistemas robóticos nestas escalas. Contudo, o maior gargalo na miniaturização dos robôs é a miniaturização dos atuadores embutidos e das fontes de energia requeridas para a movimentação. Biomotores, tais como aqueles presentes na bactérias flageladas, têm sido vistos como uma das alternativas mais promissoras para a realização da propulsão destes micro e nanorobôs. Eles são vantajosos quando comparados com os propulsores realizados pelos seres humanos porque são menores, capazes de realizar movimentos complexos e de converter energia com muita eficiência. Este projeto foca no desenvolvimento de sistemas computacionais e aparato de controle de bactérias magnetotáticas com intuito de realizar pesquisas robóticas em pequena escala, visando diferentes tipos de futuras aplicações, tais como carregamento de fármacos, biosensores, enxames de pequenos robôs, etc.

**Palavras-chave**— Nano e Micro-robótica, Bactérias Flageladas, Planejamento e Controle de Robôs.

## 1 Introdução

Muitas histórias de ficção científica vislumbraram enxames de microrobôs capazes de realizar atividades complexas de forma coletiva. Em um filme muito conhecido, Viagem Fantástica (1966), um grupo de médicos é miniaturizado juntamente com um submarino e injetados no corpo de um cientista para drenar um coágulo. Muitas destas obras, são pura ficção e nunca sairão das telas de cinema e páginas de livros. Porém, histórias como estas inspiram muitos cientistas na resolução de problemas reais. Mais recentemente, com

o avanço das pesquisas em nanotecnologia, novas ideias e inspirações surgiram. Contudo, as máquinas moleculares construídas pelos seres humanos a partir de um número discreto de componentes moleculares e projetadas para executar uma tarefa pré-determinada em conjunto, como imaginado em (Drexler, 1992), estão ainda longe de serem realizadas.

Os desenvolvimentos recentes da engenharia em micro e nano escala possibilitaram a realização de vários robôs móveis miniaturizados (Donald et al., 2006) (Yesin et al., 2006). Contudo, o maior gargalo na miniaturização dos robôs, visando a

micro e nano escala, é a miniaturização dos atuadores embutidos e as fontes de energia requeridas para a movimentação. Biomotores têm sido vistos como uma das alternativas mais promissoras para a realização da propulsão deste micro e nanorobôs (Behkam and Sitti, 2007) (Martel et al., 2006). Eles são vantajosos quando comparados com os propulsores realizados pelos seres humanos porque são menores e capazes de realizar movimentos complexos. Ainda mais importante, estes biomotores são capazes de converter energia química em energia mecânica com muita eficiência (Behkam and Sitti, 2007) (Martel et al., 2006).

Considerando então o uso de biomotores em aplicações robóticas, bactérias flageladas passaram a ser usadas como possíveis propulsores, já que estas estruturas apresentam um motor biológico embutido e de alta eficiência. Estas estruturas podem ser exploradas principalmente em ambientes aquosos.

A integração das bactérias flageladas como componentes funcionais foi apresentada primeiramente em (Darnton et al., 2004), onde a bactéria *Serratia marcescens* foi anexada a polidimetilsiloxano ou poliestireno para formar um “carpete bacteriano” para mover fluido. Neste caso, as bactérias operam sem o controle externo apropriado para a manipulação de micro-objetos. Tipicamente, as bactérias nadam de acordo com algum estímulo químico, guiada por substâncias atrativas, tornando sua movimentação não previsível. Apesar da falta de controle direcional das bactérias, em (Behkam and Sitti, 2007) é mostrado uma alternativa para desligar e religar o movimento das bactérias através de estímulos químicos.

Diferentemente da maioria das bactérias que são baseadas em estímulos químicos para detectar nutrientes e então influenciar seus movimentos, a direção de deslocamento de bactérias magnetotáticas (MTB) é dada por estímulos magnéticos (Frankel and Blakemore, 1980) (Denham et al., 1980). Isto se deve à cadeia de magnetossomos, nanopartículas magnéticas envolvidas por membranas, sintetizada no interior da bactéria. Esta influência magnética é mais adequada ao controle externo da movimentação das bactérias, sendo possível a criação de uma interface eletrônica controlada computacionalmente.

A mobilidade das MTB já foi explorada no passado através do uso de sistemas ímãs ou eletroímãs permanentes, tipicamente em aplicações como a separação de micro-objetos de baixa massa em um campo magnético constante (Bahaj et al., 1998). A micromanipulação controlada de MTB usando microeletroímãs também já foi reportada (Lee et al., 2004).

Desta forma, dada às características das MTB, estas passaram a ser vistas como possíveis atuadores biológicos, controladas por computadores, capazes de realizar a propulsão eficiente e

precisa de microrobôs e micro-objetos para realizar operações precisas, como sugerido em (Martel et al., 2006) (Martel, 2005). Nestes trabalhos, foi mostrado a possibilidade de controle de uma única bactéria movendo um micro-objeto de pequena dimensão.

Mais recentemente, alguns trabalhos têm mostrado a possibilidade da manipulação de micro-objetos maiores através do controle de um enxame de MTB, ao invés do controle de uma única bactéria (Martel and Mohammadi, 2010). O uso de enxame possibilita inclusive o controle de microrobôs construídos com sistemas de comunicação e processamento embarcados (Martel, André, Mohammadi, Lu and Felfoul, 2009).

As primeiras aplicações em laboratórios devido ao controle da MTB já começam a surgir e se concentram principalmente em projetos biológicos de carregamento de fármacos e sensoriamento (Mokrani et al., 2010) (Martel, Mohammadi, Felfoul, Lu and Pouponneau, 2009). Contudo, diversas outras aplicações podem ser realizadas.

O objetivo específico deste projeto é o desenvolvimento de um sistema nano e microrobótico autônomo capaz de realizar atividades previamente definidas. Mais especificamente, o projeto visa o desenvolvimento de sistemas computacionais e um aparato de controle de bactérias magnetotáticas (MTB) com aporte computacional capaz de executar diferentes tarefas. Este trabalho relata os resultados obtidos pelo projeto até o presente momento e discute as propostas futuras de automação, por exemplo, por controle fuzzy.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. A seção 2 apresenta um breve resumo sobre as bactérias magnetotáticas, o arranjo experimental proposto é apresentado na seção 3, os resultados experimentais obtidos são apresentados na seção 4, a seção 5 discute os resultados obtidos e as próximas etapas de trabalho e, finalmente, a seção 6 conclui o trabalho.

## 2 Bactérias Magnetotáticas

Bactérias magnetotáticas ou magnéticas são microrganismos que se orientam e navegam propulsores pelos seus flagelos ao longo das linhas de campos magnéticos devido às partículas denominadas magnetossomos (Silveira and Lins, 2007). Os magnetossomos são considerados organelas formadas por um cristal magnético envolvido por uma membrana lipo-protéica. Cada cristal é composto pelo óxido de ferro magnetita ( $Fe_3O_4$ ) ou pelo seu isomorfo magnético de enxofre, a greigita ( $Fe_3S_4$ ). No interior de cada célula, os magnetossomos formam cadeias, de 10 a 30 partículas, que impõem à célula bacteriana um momento de dipolo magnético capaz de orientá-la ao longo das linhas de um campo magnético, tal como o campo geomagnético ou mesmo um campo externo aplicado.

Os magnetossomos bacterianos são caracterizados pela distribuição de tamanho restrita à faixa dos 50 a 200nm, pela morfologia e hábitos cristalinos únicos. Eles são espécie específicos, ou seja, cada espécie bacteriana produz invariavelmente o mesmo tipo de magnetossomo, embora haja exceções. As bactérias magnetotáticas são capazes de sintetizar cristais magnéticos de magnetita ou greigita, à temperatura e pressão ambientes, por processos desconhecidos, porém muitos menos drásticos do que aqueles atualmente empregados na síntese inorgânica de compostos magnéticos. Nos ambientes aquáticos, acredita-se que as cadeias de magnetossomos são usadas para navegação na coluna de água ou entre os grãos do sedimento, utilizando o fraco campo magnético da Terra.

Diferentes bactérias magnetotáticas existem e podem ser utilizadas para a propulsão de micro-robôs e micro-objetos. Dentre estas, podemos citar a *Magnetospirillum gryphiswaldenses* que possuem aproximadamente 1,5 a 4  $\mu\text{m}$  e nadam a uma velocidade aproximada de 40 a 80  $\mu\text{m}/\text{s}$  (Martel et al., 2006). Outra bactéria, a *Magnetotactic coc-cus strain* (MC-1) tem aproximadamente 2  $\mu\text{m}$  e se movimentam a uma velocidade aproximada de 200 a 300  $\mu\text{m}/\text{s}$ . Já foi mostrado que a força propiciada por uma única bactéria MC-1 excede 4pN (Martel and Mohammadi, 2010).

Bactérias flageladas, tal como as bactérias magnetotáticas, usam seus flagelos como motores rotatórios para gerar propulsão. As MTB, como já citado anteriormente, se orientam e nadam ao longo do fraco eixo magnético da Terra (0,5 G). Desta forma, se as MTB estiverem posicionadas em um ambiente controlado, a simples geração de um campo magnético externo é capaz de alterar a orientação destas bactérias, controlando a movimentação das mesma.

Já foi demonstrado que uma MTB controlada por campo externo é suficientes para mover objetos com diâmetros de 6,2  $\mu\text{m}$  por caminhos pré-determinados. É importante salientar que este comportamento ocorre em ambientes com coeficiente de Reynolds muito baixo (Martel and Mohammadi, 2010). Neste caso, um fluxo laminar, calmo e constante ocorre, ao contrário de ambientes de fluxo turbulentos.

Em muitas aplicações é interessante controlar um enxame de MTB ao invés de uma única bactéria. Neste caso, um campo não-uniforme especial pode ser usado para concentrar em um único ponto as bactérias inicialmente espalhadas em um meio líquido. Em (Martel and Mohammadi, 2010) os autores demonstraram como um enxame de 5000 MTB pode ser controlado em conjunto de forma a realizar uma tarefa específica. Neste caso, uma pirâmide, com blocos de dimensões de 80  $\mu\text{m}$  x 20  $\mu\text{m}$  x 15  $\mu\text{m}$ , foi construída em um plano, mostrando o poder de manipulação

destas bactérias flageladas.

Especificamente neste trabalho, utilizamos a bactéria magnetotática *Magnetospirillum gryphiswaldense* que é uma Alphaproteobactéria encontrada em água doce tendo 1,5 a 4  $\mu\text{m}$  de tamanho e crescimento microaerófilo, necessitando de baixas concentrações de oxigênio para crescer. A partir de um processo de biomineralização biologicamente controlada, são sintetizados nanocristais cubo-octaédricos de magnetita com monodomínio magnético envoltos por uma bicamada lipídica em seu interior. Esta estrutura composta do cristal magnético e da membrana tem seu tamanho entre 40 e 60nm e é chamada magnetossomo. Ao alinhar estes cristais em cadeia a bactéria é capaz de se orientar em relação a campos magnéticos, mesmo que de baixa intensidade. O movimento bacteriano é resultado da rotação coordenada de dois flagelos situados um em cada polo da célula, e seu metabolismo é descrito como quimiorganoheterotrófico, sendo utilizados compostos orgânicos como fonte de carbono e elétrons.

### 3 Arranjo Experimental

Este projeto visa o desenvolvimento de um aparato de controle de MTB para a realização de sistemas micro e nanorobóticos, controlados computacionalmente. Conforme já foi descrito anteriormente, o controle da movimentação das MTB é feito variando-se o campo magnético externo. A seguir, será descrito, em detalhe, o aparato de controle necessário para este projeto.

A figura 1 apresenta um esquemático simplificado do aparato de controle de MTB proposto. A seguir a montagem do microscópio e do sistema de controle das bactérias será discutida.

#### 3.1 Microscópio

Devido ao tamanho das bactérias e dos objetos que por ventura venham a ser manipulados, o uso de um microscópio óptico de boa qualidade é imprescindível. Visando o desenvolvimento de aplicações futuras e considerando a ampliação do sistema de manipulação (inclusão de pinças ópticas

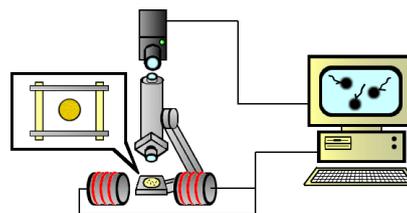


Figura 1: Esquemático simplificado do aparato de controle de MTB.

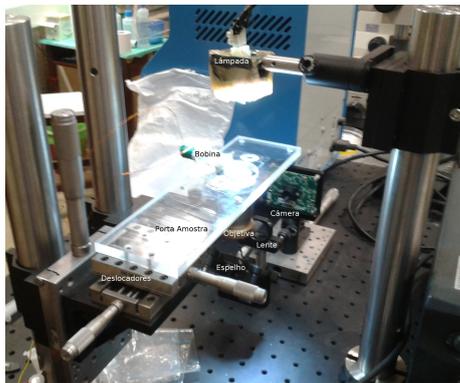


Figura 2: Microscópio aberto construído para gerar as imagens.

e magnéticas), um microscópio óptico aberto foi montado. Outra vantagem deste tipo de microscópio é o baixo custo, quando comparado com os microscópios fechados. Além disso, a montagem de um microscópio aberto facilita o encaixe e configuração do sistema magnético de controle, conforme será descrito mais adiante.

O microscópio aberto invertido montado neste trabalho é mostrado na figura 2. Todas as peças foram importadas e o microscópio foi montado em nosso laboratório. Este consiste de uma lâmpada de LED comum, que ilumina as bactérias posicionadas em um porta amostra de acrílico. Utilizou-se acrílico para evitar distorções no campo magnético que poderiam ser gerados por um porta amostra metálico. A imagem das bactérias é capturada por uma objetiva Nikon 100x, a saída da objetiva é refletida por um espelho posicionado em 45 graus e posteriormente passa por uma lente antes de atingir uma câmera Dragonfly. A câmera é ligada a um computador via interface firewire.

### 3.2 Sistema de Controle Magnético

Este sistema é constituído por um gerador de campo magnético para orientar as bactérias magnetotáticas ao longo de um caminho pré-definido. Existem duas maneiras de implementar este gerador de campo magnético. Na primeira opção, fios podem ser posicionados próximos às bactérias de modo a gerar um campo magnético para as bactérias. Esta alternativa foi testada, porém nenhum resultado foi observado, já que a movimentação das bactérias não foi influenciada pelo campo gerado. Desta forma, decidiu-se construir uma bobina com fios de cobre enrolados em um bastão de ferrite de 5 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro. O ferrite é utilizado para ajudar a direcionar o campo magnético. Esta bobina foi ligada a um gerador de sinais através de um amplificador de corrente. A bobina é mostrada na figura 3 e a cor-

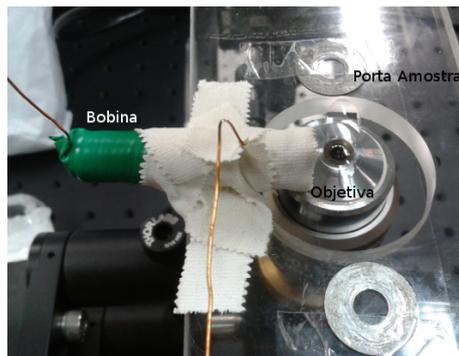


Figura 3: Bobina usada para gerar campo magnético, posicionada no porta amostra.

rente varia de -1,5 A a 1,5 A, dando a direção do campo. É importante reforçar que nenhuma energia elétrica é necessária para mover as bactérias e, conseqüentemente, propulsionar os micro-objetos. As MTB possuem auto-propulsão, já que são organismos vivos. Desta forma, a energia é necessária apenas para gerar o campo eletromagnético para orientar as MTB.

## 4 Resultado Experimental

Os experimentos apresentados neste trabalho foram obtidos a partir do uso de uma única bobina, possibilitando a variação do campo magnético em um eixo. Uma segunda bobina está sendo construída para ser posicionada de modo ortogonal com a primeira, possibilitando o controle das bactérias no plano.

A figura 4 mostra uma bactéria magnetotática sendo controlada a partir do campo magnético gerado pela bobina criada. O número mostrado em cada imagem corresponde a um instante de tempo de forma crescente, ou seja, inicia na imagem 1 e termina na imagem 6. Pode-se observar pelas imagens 1, 2 e 3 que a bactéria se movimenta para a esquerda. Em seguida, a corrente elétrica usada para gerar o campo magnético é invertida, invertendo também o campo magnético. Pode-se observar nas imagens 4, 5 e 6 que a mesma bactéria passa a se movimentar para a direita. O fato da bactéria aparecer branca nas três primeiras imagens e escura nas imagens seguintes se deve ao foco do microscópio e a alteração na posição da bactéria no eixo perpendicular ao plano da amostra, não controlada neste caso.

É importante relatar que bactérias mortas que possuem magnetossomos também são influenciadas pelo campo magnético gerado. Contudo, diferentemente das bactérias vivas, estas não se deslocam, mas apenas rotacionam no próprio eixo quando o campo magnético é invertido. Este fato é importante por duas razões. Primeiro, a rotação das bactérias mortas coincide com a mudança

de sentido na movimentação das bactérias vivas, confirmando a resposta ao campo por estas últimas. A segunda, e mais importante observação, é que isto comprova que as bactérias não estão sendo atraídas por um campo magnético forte, mas simplesmente tem sua movimentação direcionada pelo campo.

## 5 Discussão e Próximos Passos

O resultado apresentado na seção anterior comprova que um campo magnético externo, gerado por uma bobina, é capaz de orientar a movimentação das bactérias magnetotáticas. Nesta prova de conceito, apenas uma bobina foi utilizada, permitindo a mudança no sentido da movimentação da bactéria em um eixo. O próximo passo deste projeto é a inserção de mais uma bobina no sistema, posicionada de forma ortogonal à primeira, possibilitando não somente mudar o sentido como também a direção da bactéria. Especificamente neste trabalho, a bactéria utilizada foi a *magnetospirillum gryphiswaldense*. Esta não é a bactéria ideal para os experimentos, devido ao seu difícil controle e orientação. Em alguns experimentos, por exemplo, observou-se bactérias diferentes se movimentando em sentidos opostos durante a aplicação do mesmo campo magnético. Os experimentos aqui apresentados foram validados a partir da observação de apenas uma bactéria. Este comportamento dificultará o futuro controle de um enxame de bactérias. Contudo, como as bactérias são fornecidas por um colaborador de outro estado, estas são as únicas que conseguem se manter vivas durante o trajeto. A cultura eficiente de bactérias mais apropriadas está sendo realizada e em breve novos experimentos serão executados.

Atualmente, a mudança na corrente aplicada à bobina tem sido feita de forma manual. Contudo, a ideia é que este controle seja feito computacionalmente. Um novo sistema já está sendo desenvolvido, onde um sistema de aquisição de dados NI USB 6009, da National Instruments e com saída analógica, será usado para fornecer a corrente que será aplicada à bobina. O sistema conecta-se ao computador via interface USB e um algoritmo em linguagem C poder ser usado para variar a corrente. Em um primeiro momento, a corrente será alterada por interação com o teclado ou mouse. Contudo, em breve visamos usar um sistema autônomo de controle.

O sistema autônomo receberá as imagens do microscópio, identificando as posições das bactérias e micro-objetos a serem manipulados. Desta forma, o sistema definirá automaticamente as correntes que serão aplicadas às bobinas, de forma a gerar o campo magnético ideal para movimentar as bactérias necessárias. Futuramente, um sistema fuzzy (Lee, 1990) será implementado para

controlar as bactérias, levando à aplicação desejada. Neste caso, as posições do enxame de bactérias e dos objetos a serem manipulados podem ser usados como entrada do sistema fuzzy que gerará como saída a corrente elétrica aplicada à cada bobina, possibilitando a movimentação correta das bactérias.

## 6 Conclusões

Neste trabalho nós apresentamos o controle de bactérias magnetotáticas com o intuito de aplicá-las em sistemas de micro e nano-robótica. Conforme discutimos, um dos grandes gargalos para a realização de robôs em pequena escala é a miniaturização dos sistemas de propulsão e a geração de energia. Contudo, podemos explorar estas propriedades em bactérias flageladas para a realização de robótica em nano e microescala. As bactérias magnetotáticas são orientadas por um campo magnéticos e, desta forma, podemos construir um sistema que gere os campos magnéticos necessários para o controle destes microorganismos. Neste trabalho apresentamos o desenvolvimento de um microscópio aberto, integrado a um eletroímã controlado externamente. Este sistema foi capaz de controlar a movimentação de bactérias *Magnetospirillum gryphiswaldense* em um eixo. Também provamos que o campo magnético gerado não atrai as bactérias vivas, mas apenas direcionam seus movimentos. Observamos que bactérias mortas não mudam de posição e apenas rotacionam em seu próprio eixo quando o campo magnético é invertido. Como próximos passos desta pesquisa podemos listar, em ordem, as seguintes atividades: controle da corrente das bobinas via software, adição de uma segunda bobina para controle das bactérias em duas dimensões, experimento com outras bactérias, criação e controle de um enxame de bactérias, dentre outros.

## Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer a Fapemig, a PRPq-UFMG e a Thornton Eletrônica LTDA.

## Referências

- Bahaj, A., James, P. and Moeschler, F. (1998). Low magnetic-field separation system for metal-loaded magnetotactic bacteria, *Journal of magnetism and magnetic materials* **177**: 1453–1454.
- Behkam, B. and Sitti, M. (2007). Bacterial flagella-based propulsion and on/off motion control of microscale objects, *Applied Physics Letters* **90**(2): 023902–023902.

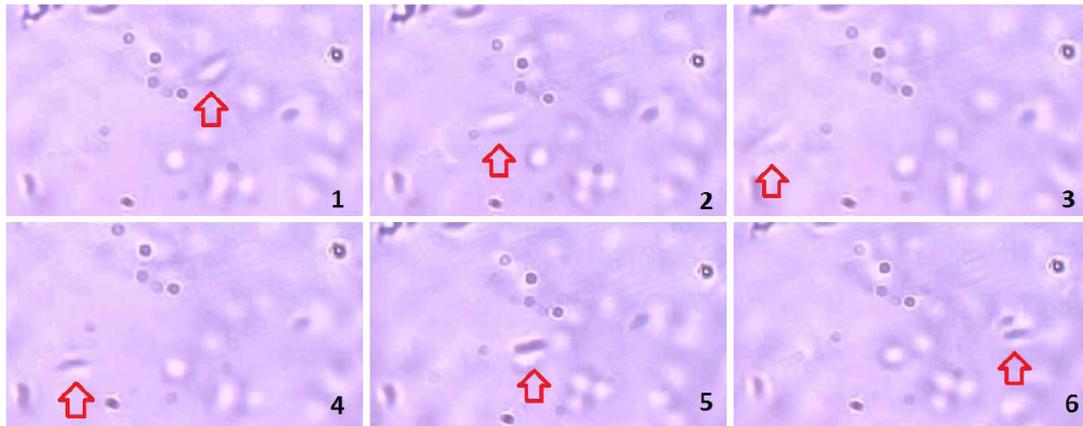


Figura 4: Imagens obtidas pelo microscópio óptico mostrando a movimentação de uma bactéria.

- Darnton, N., Turner, L., Breuer, K. and Berg, H. C. (2004). Moving fluid with bacterial carpets, *Biophysical Journal* **86**(3): 1863–1870.
- Denham, C., Blakemore, R. and Frankel, R. (1980). Bulk magnetic properties of magnetotactic bacteria, *Magnetics, IEEE Transactions on* **16**(5): 1006–1007.
- Donald, B. R., Levey, C. G., McGray, C. D., Paprotny, I. and Rus, D. (2006). An untethered, electrostatic, globally controllable mems micro-robot, *Microelectromechanical Systems, Journal of* **15**(1): 1–15.
- Drexler, K. E. (1992). Nanosystems- molecular machinery, manufacturing, and computation(book), *New York, NY: John Wiley & Sons, Inc, 1992.*
- Frankel, R. B. and Blakemore, R. (1980). Navigational compass in magnetic bacteria, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **15**: 1562–1564.
- Lee, C. C. (1990). Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. i, *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on* **20**(2): 404–418.
- Lee, H., Purdon, A. M., Chu, V. and Westervelt, R. M. (2004). Controlled assembly of magnetic nanoparticles from magnetotactic bacteria using microelectromagnets arrays, *Nano Letters* **4**(5): 995–998.
- Martel, S. (2005). Method and system for controlling micro-objects or micro-particles. US Patent App. 11/145,007.
- Martel, S., André, W., Mohammadi, M., Lu, Z. and Felfoul, O. (2009). Towards swarms of communication-enabled and intelligent sensotaxis-based bacterial microrobots capable of collective tasks in an aqueous medium, *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 2617–2622.
- Martel, S. and Mohammadi, M. (2010). Using a swarm of self-propelled natural microrobots in the form of flagellated bacteria to perform complex micro-assembly tasks, *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 500–505.
- Martel, S., Mohammadi, M., Felfoul, O., Lu, Z. and Pouponneau, P. (2009). Flagellated magnetotactic bacteria as controlled mri-trackable propulsion and steering systems for medical nanorobots operating in the human microvasculature, *The International journal of robotics research* **28**(4): 571–582.
- Martel, S., Tremblay, C. C., Ngakeng, S. and Langlois, G. (2006). Controlled manipulation and actuation of micro-objects with magnetotactic bacteria, *Applied Physics Letters* **89**(23): 233904–233904.
- Mokrani, N., Felfoul, O., Zarreh, F. A., Mohammadi, M., Aloyz, R., Batist, G. and Martel, S. (2010). Magnetotactic bacteria penetration into multicellular tumor spheroids for targeted therapy, *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE*, IEEE, pp. 4371–4374.
- Silveira, T. S. and Lins, U. (2007). Bactérias magnetotáticas, *Boletim da Sociedade Brasileira de Limnologia* **36**(1): 15.
- Yesin, K. B., Vollmers, K. and Nelson, B. J. (2006). Modeling and control of untethered biomicrorobots in a fluidic environment using electromagnetic fields, *The International Journal of Robotics Research* **25**(5-6): 527–536.