

Título em Português: Análise de dados da propagação dos pulsos elétricos de peixes da espécie *Gymnotus carapo*

Título em Inglês: Data analysis on the water propagation of electric pulses from *Gymnotus carapo*

Autor: Rafael Seixas de Albuquerque

Instituição: Universidade de São Paulo

Unidade: Instituto de Física de São Carlos

Orientador: Reynaldo Daniel Pinto

Área de Pesquisa / SubÁrea: Biofísica de Processos e Sistemas

Agência Financiadora:

ANÁLISE DE DADOS DA PROPAGAÇÃO DOS PULSOS ELÉTRICOS DE PEIXES DA ESPÉCIE *GYMNOTUS CARAPO*

Autor: Rafael Seixas de Albuquerque

Orientador: Reynaldo Daniel Pinto

Instituto de Física - USP

rafaelseixas@usp.br

Objetivos

Peixes elétricos de campo fraco da espécie *Gymnotus carapo* têm hábitos noturnos, possuem um sistema sensorial e um órgão gerador (OE) especializado para captar e produzir pulsos elétricos. O sistema nervoso desses animais evoluiu de modo a utilizar este “sentido elétrico” para navegação (eletrolocalização) e para comunicação social (eletrocomunicação). Os pulsos elétricos são facilmente detectáveis e podem também ser usados para interagir diretamente com o sistema nervoso dos animais de modo não-invasivo. Tradicionalmente, o modelo de dipolo elétrico tem sido amplamente usado na literatura para modelar o comportamento do OE.

Em uma dissertação de mestrado recente, um estudante de nosso grupo, desenvolveu um aparato para estudar como o sinal elétrico se propaga na água em experimentos com os animais e com dipolos artificiais. Nessa dissertação, os dados preliminares, obtidos com 4 peixes, indicaram que a propagação do sinal nos peixes é muito diferente do que acontece nos dipolos elétricos. Observamos, nos peixes, um decaimento exponencial da amplitude dos pulsos em função da distância ao transmissor, e que a constante de decaimento independe do tamanho do peixe e das condições de contorno. Entretanto, verificamos que a precisão desses resultados preliminares estava limitada a pequenas distâncias (~30 cm). Foi desenvolvida uma nova metodologia, baseada em técnicas de aquisição e análise para melhorar a relação sinal/ruído e estender nossos resultados para distâncias maiores, que aparentemente corrigiu as limitações iniciais. Os experimentos foram repetidos para 10 outros peixes, mas, naquele momento, não houve tempo hábil para executar as análises dos novos dados e incluí-los no trabalho.

Neste projeto de Iniciação Científica,

pretendemos dar continuidade a esta linha de pesquisa, treinando um novo estudante nas técnicas de análise de dados em neurociência, para fazer as análises dos dados já adquiridos, estendendo nossos resultados preliminares para maiores distâncias.

Métodos e Procedimentos

A investigação sobre o decaimento do campo elétrico do *Gymnotus carapo* foi iniciada por meio de simulações computacionais em Python, fundamentadas no Método da Carga Imagem Elétrica. Essa abordagem teórica foi escolhida para modelar com precisão as condições de contorno impostas pelo tanque experimental, substituindo a complexa interação física das paredes e quinas por um sistema equivalente de cargas elétricas fictícias. As simulações consideraram as paredes do tanque como um plano dielétrico, gerando cargas imagem de sinal oposto, e os vértices, que produzem cargas imagem de mesmo sinal, simplificando assim o cálculo do campo elétrico na região de interesse.

Para a validação experimental dos modelos teóricos, foi implementado um sistema de aquisição de dados composto por amplificadores biológicos (10000x e 10x), um conversor analógico-digital (Digidata 1322A) e software de tratamento de dados, com o aparato experimental devidamente isolado contra interferências externas. As medições foram conduzidas em dois tanques distintos (um de plástico e outro de vidro, com dimensões diferentes) e em duas situações: utilizando um **dipolo artificial**, alimentado por um gerador de ondas senoidais de 10 cm e 20 cm, e com **espécimes vivos** de *Gymnotus carapo* de 11 cm e 18 cm. Em ambos os casos, os animais foram mantidos em posição

estática, em conformidade com os protocolos éticos de manejo animal.

O protocolo de medição consistiu em registrar a intensidade do campo elétrico em função da distância perpendicular (D) em relação à fonte, seja o dipolo artificial ou a cabeça do peixe. Utilizou-se um eletrodo de referência fixo e um eletrodo de medição móvel, que se deslocava ao longo de um eixo pré-determinado. Para o dipolo artificial, foram testadas quatro configurações (dipolos de 10 cm e 20 cm em cada um dos dois tanques), replicando as condições simuladas. As medições com os peixes seguiram um procedimento análogo, permitindo uma comparação direta entre os dados simulados e os resultados experimentais obtidos em ambas as fontes de campo elétrico.

Resultados

A análise dos resultados obtidos no tanque de vidro, que incluiu simulações pelo método da carga imagem, medições com dipolos artificiais (10 cm e 20 cm) e com espécimes de *Gymnotus carapo* (11 cm e 18 cm), demonstrou que a comparação gráfica dos dados sugere uma forte equivalência entre os resultados dos diferentes métodos (simulação, dipolo artificial e animal), validando o método da carga imagem como uma ferramenta preditiva eficaz para o decaimento do campo elétrico nas condições experimentais estabelecidas. O modelo teórico previu com precisão o decaimento do campo elétrico medido experimentalmente com dipolos artificiais, independentemente das diferentes condições de contorno impostas pela geometria e pelo material de cada tanque. Um segundo achado fundamental, observado em ambos os cenários, foi a dependência direta entre a taxa de decaimento do campo e a geometria da fonte, com a constatação de que fontes de menor comprimento, como o dipolo de 10 cm, apresentam um decaimento de campo mais rápido em função da distância.

No estudo conduzido no tanque de vidro, a análise foi mais abrangente, incluindo medições com espécimes de *Gymnotus carapo* que se mostraram equivalentes aos resultados dos dipolos artificiais e das simulações de tamanho aproximado. Contudo, uma conclusão definitiva sobre a abstração do

peixe como um dipolo elétrico ainda é precipitada, sugerindo a necessidade de mais dados. Em concordância, os experimentos no tanque de plástico reforçam a dependência geométrica do problema, apresentando curvas de decaimento que não concordam com os teóricos e experimentais do tanque de vidro.

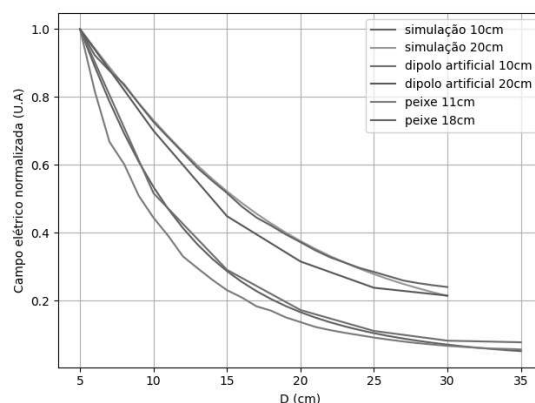


Figura 1: Gráfico de campo elétrico normalizada por distância no tanque de vidro (Decaimento do campo elétrico por diferentes métodos e geometrias, porém as condições de contorno do tanque são inalteradas)

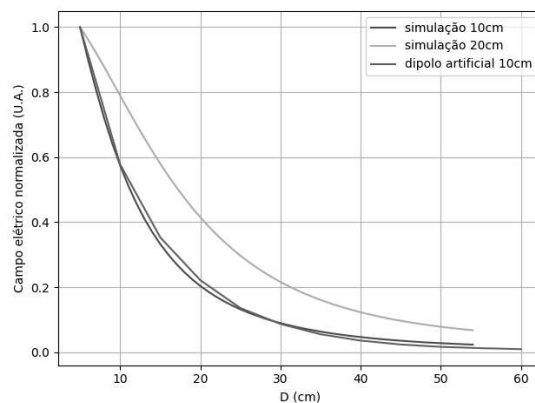


Figura 2: Gráfico de campo elétrico Normalizada por distância no tanque de plástico (Decaimento do campo elétrico por diferentes métodos e geometrias, porém as condições de contorno do tanque são inalteradas)

Conclusões

Em suma, conclui-se que a pesquisa tem ótimas perspectivas. Entendemos que muito há de ser feito, mas os resultados atuais são promissores. É importante ressaltar que o método da carga imagem era algo que precisava ser verificado que tinha as

estruturas suficientes para representar um modelo físico completo. Entendemos que sim, essa teoria é extremamente útil para rerepresentar os modelos físicos que estamos interessados em estudar (decaimento de campo elétrico na água e com condições de contorno).

Além disso, nota-se também que as dimensões dos peixes (ou mesmo o tamanho dos dipolos artificiais), o material e dimensões do tanque são parâmetros de relevância para descrever o decaimento dos campos. Ou seja, o campo elétrico produzido por *Gymnotus carapo* depende do tamanho do exemplar e de seu ambiente.

Agradecimentos

Agradeço meu orientador Reynaldo Daniel Pinto, minha família e amigos.

Agradecimento ao programa PIBIC do CNPq e a PUB da USP pelo incentivo e fomento à pesquisa nacional.

Referências

CAPUTI, Angel. The electric organ discharge of pulse gymnotiforms: the transformation of a simple impulse into a complex spatio-temporal electromotor pattern. **Journal of Experimental Biology**, Montevideo, Uruguai, v. 202, n. 10, p. 1229-1241, 1999.

CAPUTI, Angel. Electric Organs. In: FARRELL, A. (org.). Encyclopedia of fish physiology: from genome to environment. Academic press. **Encyclopedia of fish physiology**: from genome to environment. Academic press., 2011. p. 387-397.

CESARINO, V. B. **A propagação dos pulsos elétricos gerados por *Gymnotus carapo***. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 74. 2022.

David J. Griffiths. **Introduction to electrodynamics**. Tradução por Heloisa Coimbra de Souza. 3. ed., 2011, p. 85-88.

DATA ANALYSIS OF THE PROPAGATION OF ELECTRIC PULSES FROM FISH OF THE SPECIES *GYMNOTUS CARAPO*

Author: Rafael Seixas de Albuquerque

Advisor: Reynaldo Daniel Pinto

Institute of Physics - USP

rafaelseixas@usp.br

Objectives

Weakly electric fish of the species *Gymnotus carapo* have nocturnal habits and possess a sensory system and a specialized electric organ (EO) for detecting and producing electric pulses. The nervous system of these animals has evolved to use this "electric sense" for navigation (electrolocation) and social communication (electrocommunication). The electric pulses are easily detectable and can also be used to interact directly with the animals nervous system in a non-invasive way. Traditionally, the electric dipole model has been widely used in the literature to model the behavior of the EO.

In a recent Master's dissertation, a student from our group developed an apparatus to study how the electric signal propagates in water in experiments with animals and with artificial dipoles. In this dissertation, preliminary data obtained from 4 fish indicated that the signal propagation in fish is very different from what occurs in electric dipoles. We observed, in the fish, an exponential decay of the pulse amplitude as a function of the distance from the transmitter, and that the decay constant is independent of the fish's size and the boundary conditions. However, we found that the precision of these preliminary results was limited to short distances (~30 cm). A new methodology was developed, based on acquisition and analysis techniques, to improve the signal-to-noise ratio and extend our results to greater distances, which apparently corrected the initial limitations. The experiments were repeated for 10 other fish, but at that time, there was not enough time to perform the analysis of the new data and include it in the work.

In this Undergraduate Research project, we intend to continue this line of research by training a new student in data analysis techniques in neuroscience, to perform the

analysis of the already acquired data, extending our preliminary results to greater distances.

Methods and Procedures

The investigation into the electric field decay of *Gymnotus carapo* was initiated through computational simulations in Python, based on the Method of Electric Image Charges. This theoretical approach was chosen to accurately model the boundary conditions imposed by the experimental tank, replacing the complex physical interaction of the walls and corners with an equivalent system of fictitious electric charges. The simulations considered the tank walls as a dielectric plane, generating image charges of the opposite sign, and the vertices, which produce image charges of the same sign, thus simplifying the calculation of the electric field in the region of interest.

For the experimental validation of the theoretical models, a data acquisition system was implemented, composed of biological amplifiers (10000x and 10x), an analog-to-digital converter (Digidata 1322A), and data processing software, with the experimental apparatus properly shielded from external interference. The measurements were conducted in two different tanks (one plastic and one glass, with different dimensions) and in two situations: using an artificial dipole, powered by a sine wave generator at 10 cm and 20 cm, and with live specimens of *Gymnotus carapo* of 11 cm and 18 cm. In both cases, the animals were kept in a static position, in accordance with ethical animal handling protocols.

The measurement protocol consisted of recording the electric field strength as a function of the perpendicular distance (D) from

the source, whether it was the artificial dipole or the fish's head. a fixed reference electrode and a mobile measurement electrode were used, which was moved along a predetermined axis. For the artificial dipole, four configurations were tested (10 cm and 20 cm dipoles in each of the two tanks), replicating the simulated conditions. The measurements with the fish followed an analogous procedure, allowing for a direct comparison between the simulated data and the experimental results obtained from both electric field sources.

Results

The analysis of the results from the glass tank, which included simulations using the image charge method, measurements with artificial dipoles (10 cm and 20 cm), and with *Gymnotus carapo* specimens (11 cm and 18 cm), showed that the graphical comparison of the data suggests a strong equivalence between the results of the different methods (simulation, artificial dipole, and animal). This validates the image charge method as an effective predictive tool for the electric field decay under the established experimental conditions. The theoretical model accurately predicted the electric field decay measured experimentally with artificial dipoles, regardless of the different boundary conditions imposed by the geometry and material of each tank. A second key finding, observed in both scenarios, was the direct dependence between the field's decay rate and the source's geometry, with the observation that sources of shorter length, such as the 10 cm dipole, exhibit a faster field decay as a function of distance.

In the study conducted in the glass tank, the analysis was more comprehensive, including measurements with *Gymnotus carapo* specimens that were shown to be equivalent to the results from the artificial dipoles and simulations of approximate size. However, a definitive conclusion about the abstraction of the fish as an electric dipole is still premature, suggesting the need for more data. In agreement, the experiments in the plastic tank reinforce the geometric dependence of the problem, presenting decay curves that do not agree with the theoretical and experimental ones from the glass tank.

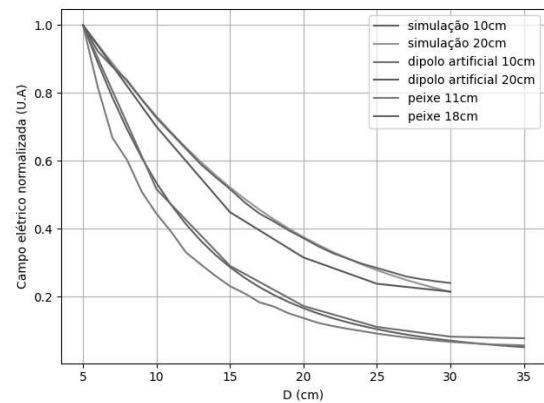


Figure 1: Graph of the electric field normalized by distance in the glass tank (Decay of the electric field by different methods and geometries, however the tank's boundary conditions are unchanged).

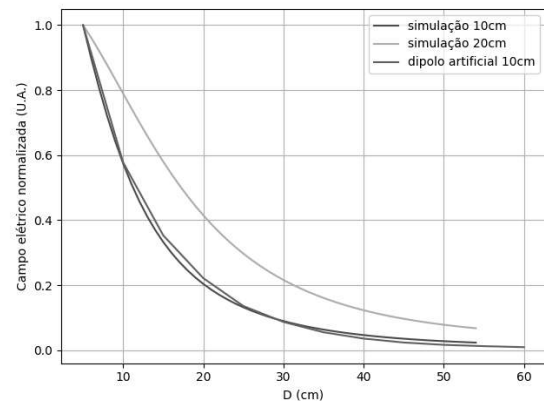


Figure 2: Graph of the electric field normalized by distance in the plastic tank (Decay of the electric field by different methods and geometries, however the tank's boundary conditions are unchanged)

Conclusions

In summary, it is concluded that the research has excellent prospects. We understand that much remains to be done, but the current results are promising. It is important to emphasize that it was necessary to verify that the image charge method had the sufficient structure to represent a complete physical model. We conclude that this theory is indeed extremely useful for representing the physical models we are interested in studying (electric field decay in water and with boundary conditions).

Furthermore, it is also noted that the dimensions of the fish (or even the size of the artificial dipoles), and the material and dimensions of the tank are relevant

parameters for describing the field decay. In other words, the electric field produced by *Gymnotus carapo* depends on the specimen's size and its environment.

Acknowledgements

I would like to thank my advisor, Reynaldo Daniel Pinto, my family, and friends.

Acknowledgements are also extended to the PIBIC program of CNPq and the PUB program of USP for their support and promotion of national research.

References

CAPUTI, Angel. The electric organ discharge of pulse gymnotiforms: the transformation of a simple impulse into a complex spatio-temporal electromotor pattern. **Journal of Experimental Biology**, Montevideo, Uruguai, v. 202, n. 10, p. 1229-1241, 1999.

CAPUTI, Angel. Electric Organs. In: FARRELL, A. (org.). Encyclopedia of fish physiology: from genome to environment. Academic press. **Encyclopedia of fish physiology**: from genome to environment. Academic press., 2011. p. 387-397.

CESARINO, V. B. **A propagação dos pulsos elétricos gerados por *Gymnotus carapo***. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 74. 2022.

David J. Griffiths. **Introduction to electrodynamics**. Tradução por Heloisa Coimbra de Souza. 3. ed., 2011, p. 85-88.