

Processamento de Sinais Biomagnéticos Medidos por Sistema SQUID Multicanal

1. Introdução

O Biomagnetismo consiste no estudo dos campos magnéticos gerados por organismos vivos ou por marcadores magnéticos inseridos nesses organismos. A detecção do campo biomagnético permite obter, de forma não-invasiva, inócuia e sem contato com o paciente, informações sobre a distribuição temporal e espacial de suas fontes, possibilitando identificar a localização e propagação da atividade elétrica nos tecidos excitáveis (correntes primárias), sem ser perturbado pelas não-homogeneidades do volume condutor ao redor dos tecidos. Esta consiste em importante vantagem com relação à medição da diferença de potencial utilizando eletrodos de superfície (Eletrocardiografia, Eletroencefalografia, Eletrogastrografia, Eletromiografia, etc.) que, por serem baseados nas correntes geradas no volume condutor (correntes secundárias), são fortemente influenciados pelas não-homogeneidades de condutividade do mesmo.

A medição do campo magnético cardíaco (magnetocardiografia – MCG) permite obtenção não-invasiva de informações às quais o ECG não tem acesso, mas que são fundamentais para a determinação das estratégias de tratamento, tais como: a caracterização das correntes contínuas (CC) resultantes de isquemia miocárdica; a determinação de anormalidades eletrofisiológicas em repouso em pacientes com *angina pectoris*, de alterações eletrofisiológicas do feixe de His, da propagação na região ventricular apical e de mecanismos de taquiarritmias atriais; além da detecção da atividade elétrica miocárdica fetal.

Por meio de uma colaboração científica com o Biomagnetisches Zentrum (BZ), Friedrich-Schiller-Universität Jena, realizaram-se medições do campo biomagnético

ultra fraco gerado pela atividade elétrica cardíaca com diversos protocolos experimentais.

O BZ tem disponível um sistema SQUID multicanal de alta resolução, consistindo em 16 canais acoplados a gradiômetros de primeira ordem, com o diâmetro das bobinas sensoras de 6,7 mm e linha de base média de 3 cm cada. Os sensores estão dispostos em uma grade de 4 x 4, cobrindo uma área de 32 x 32 mm². O sistema está imerso no interior de um dewar com configuração especial que permite uma maior aproximação do sensor à amostra experimental (6 mm), conduzindo a uma melhor relação sinal-ruído.

Contudo, era necessário implementar algoritmos de processamento de sinais digitais que permitissem analisar os fenômenos eletrofisiológicos de forma robusta, amigável e flexível. O ambiente de desenvolvimento MATLAB® foi o mais adequado ao desenvolvimento deste projeto, dispondo de diversas bibliotecas de métodos numéricos, além de permitir a implementação de interfaces gráficas com o usuário.

2. Objetivos

O objetivo geral deste projeto foi o desenvolvimento de um sistema de processamento de sinais biomagnéticos medidos por um magnetômetro multicanal, com uma interface amigável e flexível, permitindo a análise detalhada dos fenômenos eletrofisiológicos.

3. Metodologia

Os dados experimentais brutos consistem em medições de campo magnético ao longo do tempo, em 16 canais medidos simultaneamente, cada sinal com tipicamente dezenas de segundos de duração. Também está disponível um sinal elétrico medido simultaneamente, que pode ser utilizado como referência temporal para o processamento dos sinais magnéticos.

Inicialmente, foi necessário caracterizar os sinais magnéticos no domínio da frequência por meio de técnicas de Fourier e, em seguida, aplicar filtros digitais para remoção de interferência eletromagnética e outros ruídos magnéticos que foram identificados. Na sequência, foram obtidos sinais temporais correspondentes a um ciclo da atividade cardíaca, com duração típica de 0,25 a 1 segundo. Estes sinais são encontrados por meio de uma média coerente dos diversos ciclos.

Considerando o posicionamento espacial relativo dos 16 canais magnéticos, foi possível a construção de mapas bidimensionais da atividade magnética cardíaca em cada instante de tempo ao longo do ciclo de atividade cardíaca, utilizando algoritmos de interpolação linear e não-linear disponíveis no MATLAB®.

Após desenvolvidos e testados todos os módulos de processamento de sinais, os mesmos foram integrados a uma interface gráfica amigável e flexível, implementada por meio da função **guide** do MATLAB®.

A última etapa do processamento será realizada futuramente. Consiste em resolver o problema inverso magnético, buscando identificar a configuração de fontes de correntes elétricas que correspondem ao campo magnético medido. Este processamento também será feito no MATLAB®.

4. Descrição do Sistema Desenvolvido

O sistema implementado no MATLAB® foi desenvolvido a partir da função **guide** que permite, de forma simples, desenvolver aplicações com interfaces que são muito mais amigáveis ao usuário. As funções realizadas são todas baseadas nos dados coletados pelo sistema SQUID multicanal.

Tela Principal:

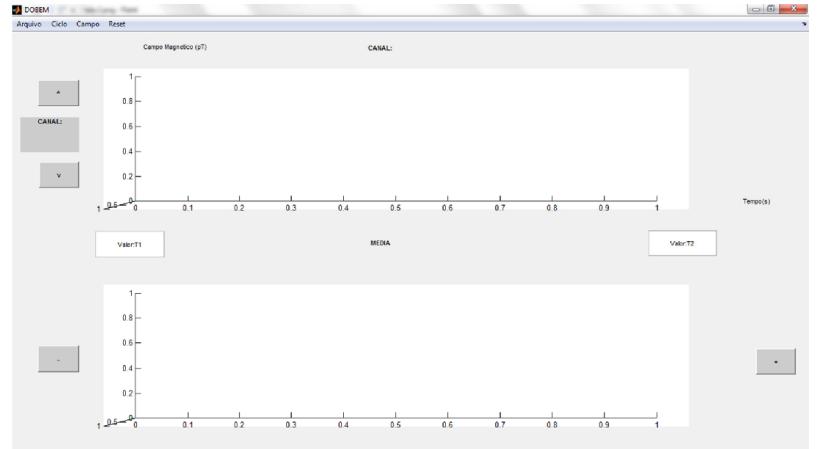


Figura 1: Tela Principal

A figura 1 traz a tela principal exibida quando inicializado o sistema. Nesta tela tem-se:

a) Planos para gráficos:

Os dois planos na tela são utilizados para exibição do sinal cardíaco medido pelos 16 canais do sistema SQUID. A tela superior exibe o gráfico do sinal no canal especificado na caixa ao lado chamada “CANAL”. Já a tela inferior exibe a média dos 16 canais medidos. O campo magnético (eixo vertical) é medido em picoteslas [pT] e o tempo (eixo horizontal) é medido em segundos [s];

b) Botões (-) e (+) na caixa CANAL:

Os botões da caixa CANAL são utilizados para selecionar o canal que se deseja observar, variando de 1 a 16. Funciona de maneira cíclica (Se o canal atual for 16 e se pressionar (+), retorna-se ao canal 1);

c) Botões de deslocamento (-) e (+):

Estes botões são utilizados para deslocar ambos os sinais plotados nos eixos no domínio do tempo. Sua variação no deslocamento é iniciada como 10 segundos, mas pode ser alterada utilizando as caixas texto abaixo do gráfico superior. O valor mínimo válido é $t_{min} = 0$ s e o valor máximo válido é o último instante temporal medido;

d) Caixas de Texto:

Estas caixas de texto (“Valor: T1” e “Valor: T2”) têm como função definir os valores do tempo inicial e final visualizados no gráfico, em segundos. Com base nestes valores, o sistema calcula o passo de deslocamento ($t_{des} = t2 - t1$).

e) Menus superiores:

Neste menu se encontram as opções Arquivo, que contém os recursos básicos do programa, Ciclo, onde são realizados os cálculos que determinam a frequência fundamental do arquivo, Campo, onde é exibido o campo magnético ao longo do tempo e do espaço, e Reset, onde todas as variáveis do programa retornam para o estado default ($t1 = 0$ e $t2 = 10$). Estas opções serão detalhadas especificamente no próximo item

Funcionamento:

A figura 2 exibe o menu cascata da opção arquivo, que possui as seguintes funções:

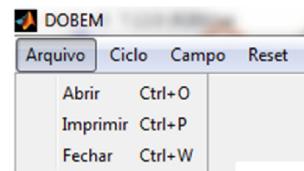


Figura 2: Menu Arquivo

I) Arquivo:

- a) **Abrir:** Abre o arquivo **.dat** dos dados brutos coletados pelo sistema SQUID.
- b) **Imprimir:** Imprime a tela principal do programa.
- c) **Fechar:** Fecha a tela principal e suas derivadas.

Selecionada a função **Abrir**, o programa permite que o usuário busque o arquivo **.dat** que contenha as informações desejadas. Funções internas obtêm os dados da frequência e tempo de aquisição do sinal cardíaco.

A figura 3 exibe o gráfico de um dos 16 canais ao longo de um período determinado pelo usuário (default canal 1, $T = 10$ s) no plano superior, e o sinal médio dos canais no plano inferior. Utilizando os botões **[+]** e **[-]** na vertical é possível alternar os canais exibidos (1 a 16). Utilizando os botões **[+]** e **[-]** na horizontal é possível caminhar ao longo de todo o sinal, deslocando-se com um passo temporal igual ao período indicado.

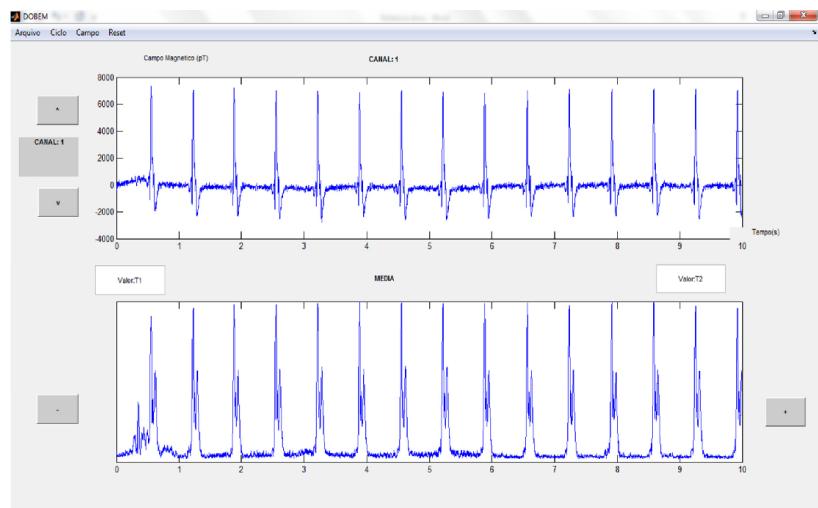


Figura 3: Arquivo de dados brutos carregado no sistema de processamento. O gráfico superior exibe um canal individual, e o gráfico inferior a média dos 16 canais.

No entanto, os dados brutos medidos pelo SQUID ainda não são ideais. Devido a sua sensibilidade, uma grande quantidade de ruído do meio externo é medido juntamente com o sinal do tecido cardíaco. Para resolver este problema e possibilitar um melhor estudo do sinal desejado, é necessária a filtragem do mesmo utilizando as ferramentas da opção **Ciclo**, exibidas na figura 4.

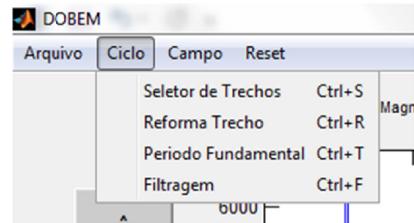


Figura 4: Menu Ciclo

II) Ciclo:

- a) **Seletor de Trechos:** Função responsável pela seleção dos trechos desejados para estudo, indicando por uma linha vertical verde o instante inicial e de vermelho o instante final. Um clique próximo às linhas verticais elimina-as para que um novo trecho seja selecionado.
- b) **Reforma Trecho:** Exibe em uma nova tela os trechos selecionados.
- c) **Período Fundamental:** Por meio de um algoritmo de busca de picos, calcula frequência e período fundamentais. Exibe em uma nova tela os picos relevantes nos trechos.
- d) **Filtragem:** Utilizando os dados coletados, calcula o ciclo cardíaco médio no trecho de um período fundamental.

A função **Seletor de Trechos** permite que o usuário escolha quais trechos do sinal total lhe parecem relevantes ao estudo dos fenômenos eletrofisiológicos do tecido cardíaco submetido ao sistema. Após alguns segundos (Figura 5), o mouse se torna uma cruzeta que será utilizada para demarcar os pontos que deverão ser guardados em um vetor.

Selecionado o ponto, as linhas verticais delimitaram seu trecho (Figura 6). Poderão ser selecionados tantos trechos quanto possível para o trecho exibido. Caso deseje-se selecionar pontos além do trecho inicial, pressiona-se a tecla ENTER, que avança o sinal no tempo, permitindo utilizar novamente a opção de seleção de trecho (Figura 7). A série de vetores criados é concatenada em apenas um grande vetor. Futuramente, o programa será capaz de salvar este vetor em um arquivo **.dat**, para que o usuário possa acessá-lo toda vez que utilizar o programa, sem a necessidade de selecionar os trechos novamente.

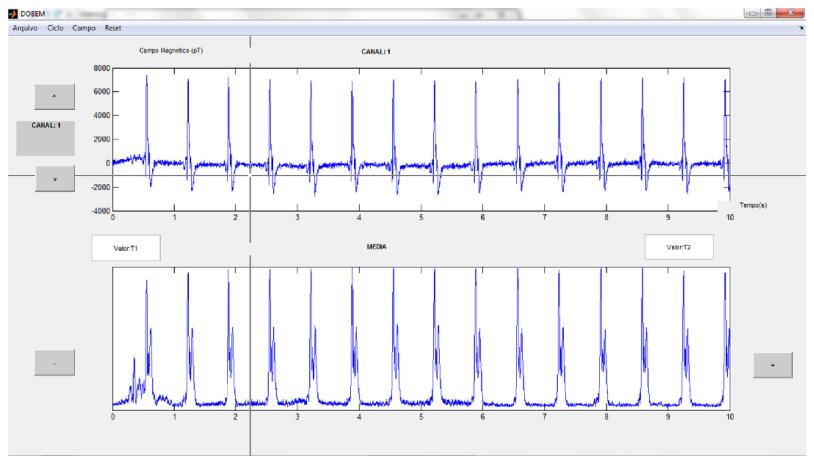


Figura 5: Cruzeta de Seleção.

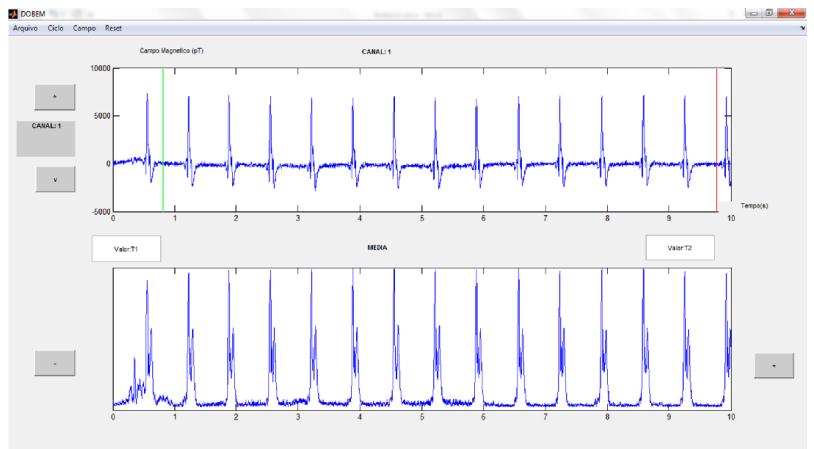


Figura 6: Indicadores verticais de trecho selecionado (verde: início, vermelho: fim).

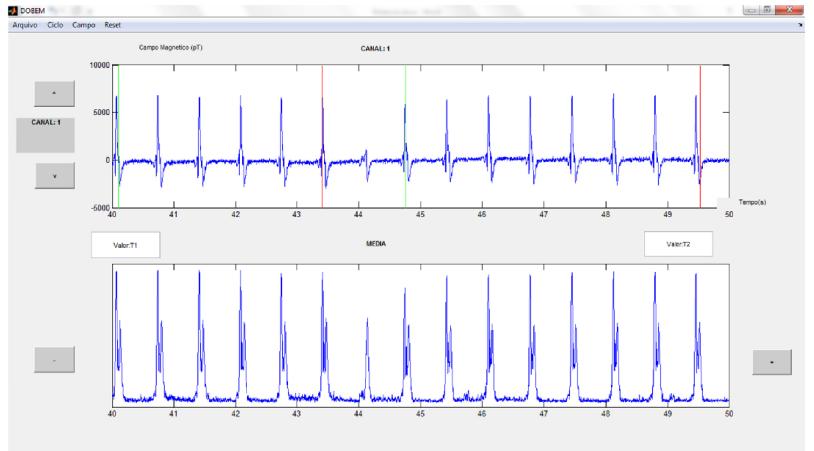


Figura 7: Exemplo de múltiplos trechos selecionados.

A função **Reforma Trecho** é uma ferramenta para que o usuário possa visualizar os trechos selecionados anteriormente. Os trechos são exibidos de forma crescente ao longo do tempo (Figura 8). Caso o usuário não esteja satisfeito com os trechos, é possível limpar o vetor por meio da opção **Reset** (Figura 9).

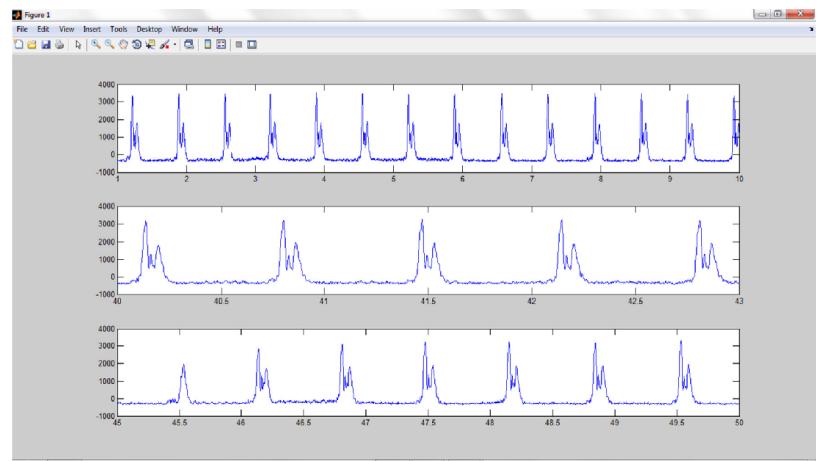


Figura 8: Trechos selecionados do sinal bruto para cálculo da média.

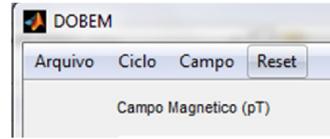


Figura 9: Menu Reset

Como um MCG (magnetocardiograma) típico é um sinal de características periódicas, é possível, utilizando-se de um algoritmo de busca de picos, calcular o período fundamental. O cálculo consiste em inicialmente encontrar os instantes temporais correspondentes aos picos, para assim determinar o período médio do sinal. Este processo é executado pela função **Período Fundamental**.

Inicialmente, o programa encontra o maior valor da intensidade de campo magnético encontrado e o utiliza como base para definir o que é um pico. Utilizando funções internas do MATLAB® o endereço do vetor de trechos é catalogado como pico ou não-pico. Por meio dos endereços dos picos é possível diferenciá-los e, aplicando a ferramenta estatística da moda, obter qual a distância mais frequente entre os picos. Com a distância modal calculada, é possível realizar o processo de catalogação de picos de forma mais robusta, garantindo sua periodicidade.

Como cada pico está relacionado com um determinado instante de tempo, o programa resgata o vetor temporal obtido conjuntamente com os endereços e, mais uma vez por meio de diferenciação e moda, obtém o tempo entre picos mais frequente. Para uma maior exatidão, é feito um loop para eliminar os picos que mais destoaram da moda calculada. Finalmente, é feita a média entre esses novos instantes de tempo e obtido o período fundamental do sinal para cada um dos 16 canais e exibido os trechos com seus picos destacados em vermelho (Figura 10).

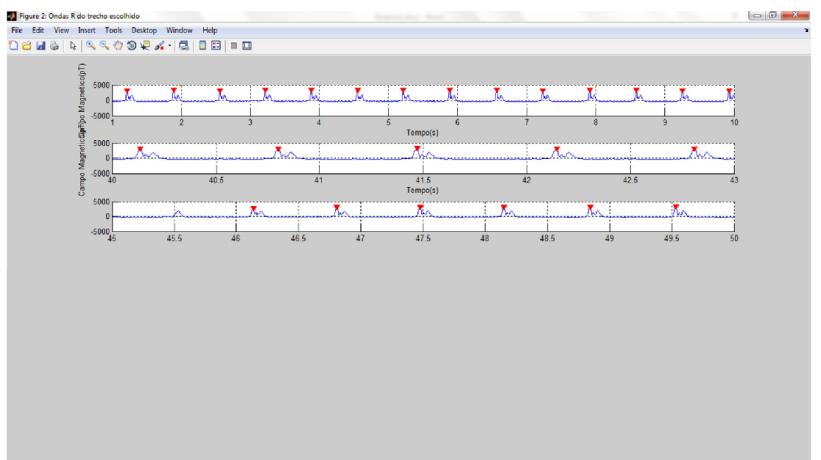


Figura 10: Picos encontrados.

Os dados obtidos até aqui são suficientes para finalmente obter o ciclo cardíaco médio para os 16 canais.

Utiliza-se para isso a função **Filtragem**. O processo de filtragem utiliza o período fundamental encontrado para dividir todo o vetor do tempo de aquisição total recebido do arquivo de dados brutos e sobrepõe os endereços de picos sobre o MCG original. O resultado final será o gráfico do período fundamental medido pelos 16 canais do SQUID (Figura 11).

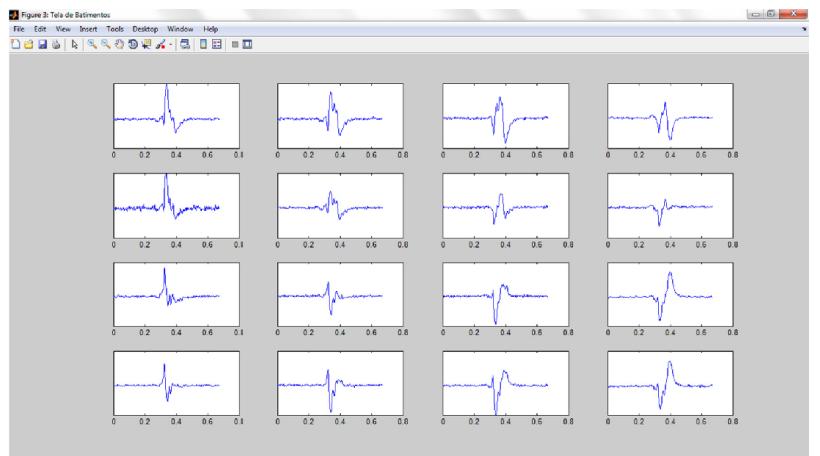


Figura 11: Sinal do ciclo cardíaco médio dos 16 canais.

Com o ciclo cardíaco médio anteriormente obtido, é possível construir o gráfico do MCG bidimensional no plano de medição dos canais do sistema, utilizando rotinas de interpolação bidimensional encontradas na função **Campo** (Figura 12).

III) Campo:

A opção interpola e exibe o comportamento do campo magnético ao longo do tempo e do espaço.



Figura 12: Menu Campo

O programa exibe uma série de momentos encontrados em sequência, produzindo uma visualização dinâmica do comportamento do campo magnético ao longo do tempo. Nas figuras 13, 14 e 15, são exibidos os campos dipolares que se formam devido às correntes elétricas que percorrem o tecido cardíaco. Por meio da observação do comportamento destes dipolos é possível diagnosticar anomalias no coração, como por exemplo o Flutter (ritmo anormal no átrio ou ventrículo).

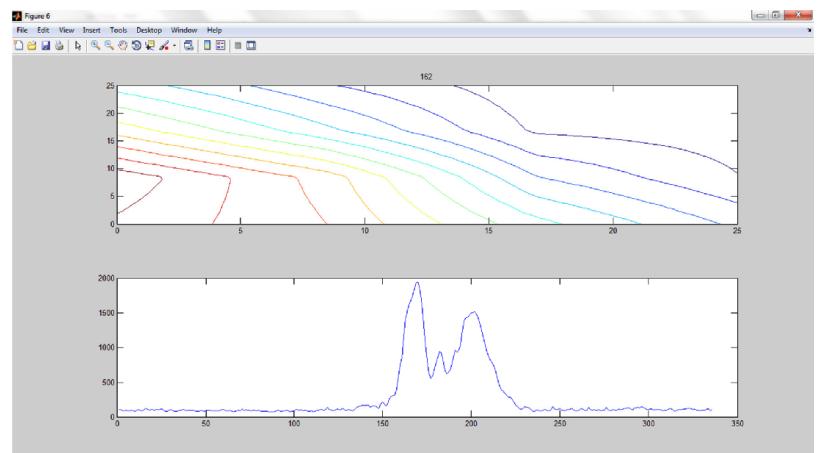


Figura 13: Mapa de isocampo magnético no instante 162 ms

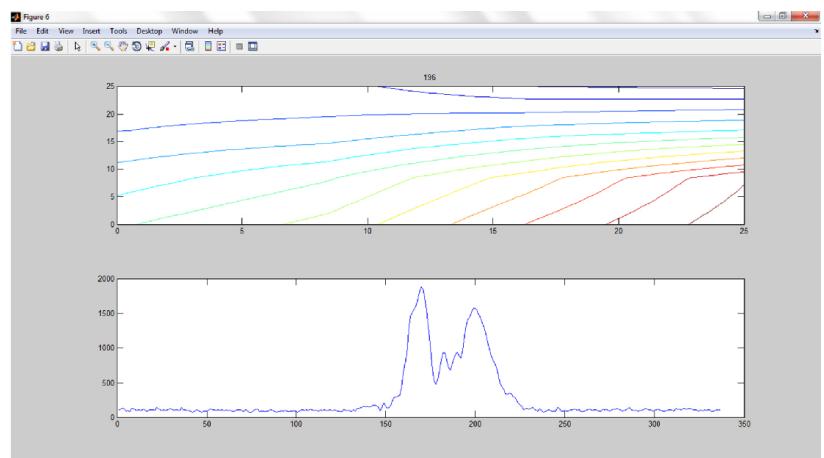


Figura 14: Mapa de isocampo magnético no instante 196 ms

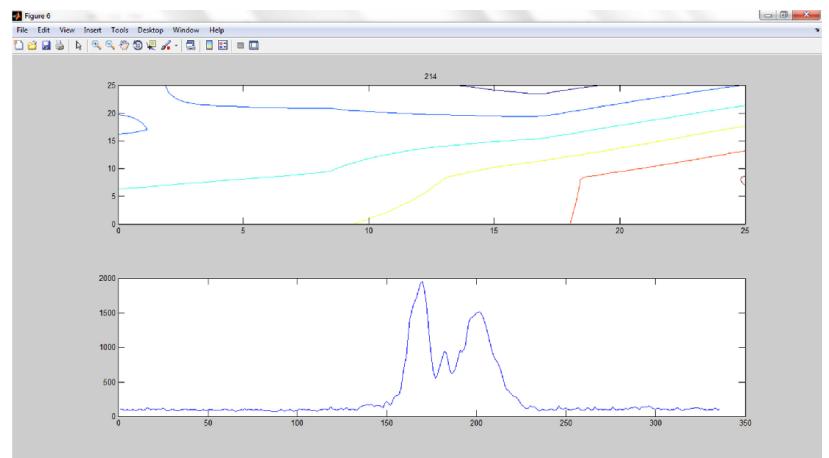


Figura 15: Mapa de isocampo magnético no instante 214 ms

5. Conclusões:

Este projeto de Iniciação Científica permitiu o desenvolvimento de um sistema computacional gráfico e interativo, baseado na plataforma MATLAB®, dedicado ao processamento de sinais magnetocardiográficos obtidos por um sistema SQUID multicanal (com dezenas de canais).

A versão atual do sistema permite a determinação do ciclo médio cardíaco em cada um dos 16 canais por meio de uma média temporal coerente baseada na frequência cardíaca média. Os ciclos cardíacos médios correspondentes aos 16 canais magnetocardiográficos permitem, então, a obtenção de mapas bidimensionais da evolução temporal do campo magnético associado à atividade elétrica cardíaca.

Assim, o sistema desenvolvido já permite a análise de diversos fenômenos eletrofisiológicos relacionados à atividade cardíaca, e será aperfeiçoado para incluir a solução do problema inverso magnético, estimando a distribuição de corrente elétrica no músculo cardíaco ao longo do tempo.