

Construção do Hardware de um Tomógrafo por Impedância Elétrica

Alvaro Yuh Yojo
balvaro@gmail.com

Resumo. Este trabalho trata do projeto e da construção de um tomógrafo por impedância elétrica para utilização em pesquisas. A tomografia por impedância elétrica (EIT) aplicada à área da saúde é uma metodologia que tem por finalidade gerar imagens de órgãos no interior do corpo humano baseada no envio de uma corrente elétrica através do corpo e na estimativa da distribuição da impedância elétrica dentro do domínio, com condições de contorno medidas através de eletrodos conectados à pele. Neste trabalho apresenta-se um hardware para injeção de corrente nos diversos eletrodos, um software de controle e aquisição de sinais. O hardware tem 32 canais, uma fonte de corrente de 125 kHz e circuitos que permitem a escolha dos eletrodos que irão servir para injeção de corrente.

Palavras chave: Tomografia, Imageamento (Bioengenharia), Processamento de sinais.

1. Introdução

A tomografia por impedância elétrica é uma técnica de se obter imagens por meio do cálculo da impedância elétrica entre eletrodos ligados à pele do corpo, em torno da região que se quer monitorar. Esse método tem em relação como vantagens, ao método convencional, a velocidade, o custo e a viabilidade do uso em UTIs (Unidades de tratamento intensivo) e ambulâncias, a maior desvantagem está na resolução da imagem no estágio atual de desenvolvimento do método. Além das funções médicas, o método de tomografia por impedância elétrica pode ter outras aplicações, como no setor agropecuário [3] na qual pode ser usado para monitorar as condições do solo. No presente estudo serão abordados apenas tópicos referentes à área da saúde. Pode-se ver um exemplo de resultado gráfico de tomografia por impedância elétrica de pulmão na figura 1.

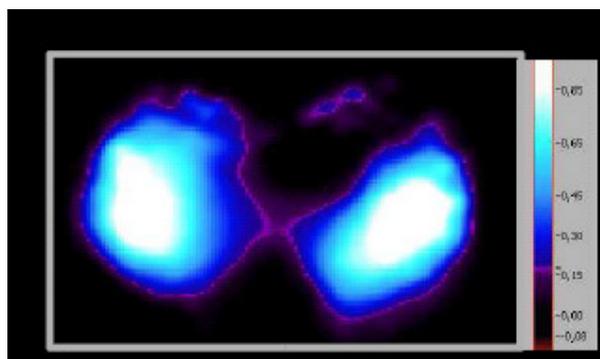


Figura 1: Exemplo de imagem produzida por meio de tomografia por impedância elétrica.[4]

As aplicações mais estudadas atualmente são [4] a monitoração do pulmão, a detecção do câncer de mama, o auxílio na perfusão cerebral e a detecção de atividade elétrica no cérebro e os métodos numéricos usados são Newton-Raphson, *simulated annealing*, otimização topológica, *backprojection*, Monte Carlo Markov Chains e filtro de Kalman não lineares.

O objetivo do projeto é construir um tomógrafo por impedância elétrica, controlado por um computador, com 32 canais de aquisição e uma fonte de corrente multiplexada de 25 KHz. Trata-se de um tomógrafo com hardware flexível quanto a modos de injeção de corrente e quanto a modos de medida de potencial elétrico, sendo destino do equipamento é comparar modos de injeção de corrente e modos de medidas de potencial elétrico, com filtros de sinal e calibração feitos essencialmente por software, facilitando modificações na abordagem dos sinais recebidos.

1.1 Estudos prévios

Para compreender o mecanismo de um tomógrafo é preciso primeiro verificar alguns aspectos do corpo humano, dos métodos de tomografia existente, das aplicações dos tomógrafos por impedância elétrica e das características de funcionamento dos tomógrafos por impedância elétrica.

1.1.1. Aspectos do corpo humano

O método de tomografia por impedância elétrica está baseado no fato de que cada tecido do corpo humano tem uma diferente condutividade elétrica, e de acordo com isso, se for possível determinar as resistências elétricas dentro do corpo é possível desenhar uma imagem dos órgãos a serem monitorados.

É importante também frisar que além de órgãos diferentes terem diferentes impedâncias, um mesmo órgão pode apresentar também diferentes impedâncias dependendo do estado em que se encontra, por exemplo o pulmão vazio tem

mais resistência que o pulmão cheio de ar. Anomalias nos tecidos também modificam a região em que estão presentes, como no caso de um tumor, a impedância fica mais baixa e no caso de um pneumotórax (bolsa de ar entre o pulmão e a pleura) a resistência aumenta devido ao ar.

1.1.2 Métodos de obtenção de imagens médicas

Existem diversos métodos de obtenção de imagens médicas, segue a descrição de algumas técnicas:

- 1 Raios X: é uma técnica baseada na passagem de raios de ondas muito curtas que atravessam o corpo e atingem uma chapa fotográfica. É usado para diagnosticar patologias principalmente nos ossos.
- 2 Ultra-sonografia: a imagem é obtida através do estudo da reflexão de uma onda de alta frequência que é refletida de modo diferente por diferentes tecidos.
- 3 Medicina nuclear: a medicina nuclear baseia-se no estudo da radiação emitida por substâncias radiativas injetadas no sangue do paciente, que tem essa radiação captada por cristais que detectam a radiação e emitem luz, que é processada por computador e transformada em imagem.
- 4 Tomografia computadorizada: produz uma imagem derivada de raios X de diversos ângulos e reconstruídas por computador para mostrar com detalhes imagens em cortes verticais ou horizontais, qualquer parte do interior do corpo.
- 5 Ressonância Magnética: é uma técnica que utiliza ondas de rádio associada a um campo magnético, valendo-se da característica de cada tecido de absorver, sob a presença de um campo magnético, a onda de um modo diferente. Pode gerar imagens em qualquer direção no corpo.

Pode-se perceber, a partir dos outros tipos de exame existentes no mercado, que as imagens médicas são precisas e claras, como no caso da ressonância magnética ou da tomografia computadorizada, mas esses exames são muito demorados e necessitam de grandes equipamentos. A técnica da tomografia por impedância elétrica, ao contrário das demais, é um exame viável para ser aplicado em Unidades de Tratamento Intensivo devido ao seu tamanho reduzido, simples aplicação ao paciente e imagens dinâmicas que são formadas rapidamente.

1.1.3 Tomógrafos por impedância elétrica

Atualmente os tomógrafos por impedância elétrica existentes têm a função de detectar algumas patologias como edema e êmbolo pulmonar, tumores de mama e ,a mais promissora função de um tomógrafo por impedância elétrica, para o monitoramento, em tempo real de tratamentos e doenças, como por exemplo, no auxílio ao tratamento de adult respiratory distress syndrome (ARDS) , que necessita de injeção de ar com alto teor de oxigênio sob pressão para recuperar o pulmão danificado. Levando-se em conta que é imprescindível que a pressão seja suficiente para inflar o órgão, mas não pode ser grande a ponto de causar mais estragos ao mesmo e que é rápida o suficiente para impossibilitar qualquer exame demorado, pode-se notar que um mecanismo de monitoramento como o tomógrafo por impedância elétrica seria muito eficaz.

O funcionamento do tomógrafo é baseado na resolução de um problema inverso de estimativa de impedância dentro de um domínio. É transmitida uma corrente através de eletrodos fixados à pele do paciente, é medido o potencial de cada ponto pré-definido na qual é colocado um eletrodo. Sabendo-se as condições de contorno é então necessário descobrir a distribuição de resistência elétrica no interior do corpo que leva a distribuição de potencial medida no contorno.

1.1.4 Aplicações para tomografia por impedância elétrica

Os estudos ligados à tomografia por impedância elétrica têm diversas vertentes, além da vertente médica, existem também as vertentes de estudo do solo e da observação industrial. Neste trabalho será abordado apenas do ponto de vista médico.

Do ponto de vista da medicina, o método pode ser usado para monitoração do pulmão, detecção de tumores (câncer de mama principalmente), detecção de perfusão e atividade elétrica no cérebro.

Algumas empresas disputam atualmente a tecnologia de melhoramento das imagens e do algoritmo para conseguir imagens mais definidas e mais rapidamente. As empresas que estão mais envolvidas atualmente são as empresas: Drager, Dixtal e Maltron na monitoração pulmonar, FDA, RPI e Darmouth na detecção de câncer de mama e Oxford Brooks na detecção de atividade elétrica cerebral.

1.1.5 O princípio matemático

A geração de imagens em um tomógrafo por impedância elétrica é feita pela estimativa da distribuição de impedância dentro de um domínio. Um dos modos de se estimar a impedância é resolvendo um problema inverso. Um problema é inverso é um problema na qual se conhece o efeito e a causa é a incógnita. No caso da tomografia por impedância elétrica, tem-se como causas, a distribuição de impedância e a injeção de corrente, e como efeito, a

distribuição de potenciais. Uma vez que se conhece a corrente injetada e a distribuição de potenciais no contorno, e a incógnita é a distribuição de impedância, trata-se de um problema inverso.

O problema, além de inverso, tem muito mais incógnitas que equações de forma que é necessário utilizar diversos artifícios para a estimativa da distribuição da impedância.

É possível resolver um problema inverso através de uma seqüência de problemas diretos. Com uma estimativa inicial para a distribuição de impedância é feito o cálculo dos potenciais no contorno. Então, esses potenciais calculados são comparados com as medições efetuadas, obtendo-se um vetor de erro. O erro é diminuído a cada iteração com a modificação da distribuição de impedâncias.

Deve considerar também na resolução do problema métodos de considerar os erros de medida de potencial que ocorrem graças ao descolamento dos eletrodos e os erros de posição devidos ao mau posicionamento dos eletrodos e também à movimentação do paciente.

Existem duas formas de se obter imagens, a forma absoluta e a relativa. A primeira tem por objetivo descobrir de forma absoluta a impedância elétrica em cada uma das regiões do corpo e a segunda é um gráfico da variação de impedância elétrica no volume de controle em questão.

O hardware montado, pela versatilidade conferida pela simplicidade e pelo fato de ser baseado muito mais em software (para filtragem e calibração, por exemplo) permite aquisição de sinais viáveis para a resolução de ambos os casos.

1.1.6 Solução do problema direto

Um dos modos de se estudar o problema é definir uma distribuição de resistividade elétrica para a região estudada, e comparar o resultado de um cálculo direto com os valores medidos.

Para se descobrir a solução do problema direto, é preciso supor uma distribuição de impedâncias elétricas no interior do corpo, é necessário discretizar o volume de controle para se conseguir valores médios para regiões, e encontrar os potenciais.

Um estudo da solução do problema direto em duas dimensões, discretizada em áreas triangulares é mostrado a seguir.

1.1.7 Metodologia para a resolução do problema direto

Para se solucionar a o problema deve-se primeiramente definir a malha de elementos finitos, apenas para fins de compreensão do método, será utilizado, como na tese de mestrado de Molina [1], utilizado um exemplo com apenas 4 elementos, bidimensionais que estão numerados e tem as arestas numeradas conforme de forma compatível com a resolução, como mostrado na figura 2.

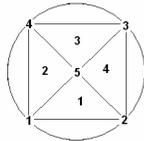


Figura 2: desenho esquemático de uma malha de elementos finitos com 4 elementos triangulares.

Define-se a matriz dos nós (Mn) e a matriz dos elementos (Me). Na primeira, são definidas as coordenadas dos nós e na segunda, os nós que compõem cada elemento.

$$Mn = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ x_4 & y_4 \\ x_5 & y_5 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$Me = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 1 & 5 & 4 \\ 4 & 5 & 3 \\ 2 & 3 & 5 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

É também calculada a condutividade local da malha para cada um dos nós:

$$y_c = \iiint_V \frac{1}{4A^2} [B]^T [D][B] dV = \frac{t}{4A} [B]^T [D][B] \quad (4.3)$$

Na qual as variáveis são definidas por:

y_c : Matriz de condutividade para um elemento triangular;
t: Espessura;
B: Matriz de geometria;
D: Matriz de propriedades;
A: Área de cada elemento.

Sendo que as matrizes B e D estão definidas a seguir:

$$B = \begin{bmatrix} \beta_i & \beta_j & \beta_m \\ \gamma_i & \gamma_j & \gamma_m \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$D = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Nas quais σ_{xx} e σ_{yy} são as resistividades elétricas e as outras variáveis estão definidas a seguir:

$$\begin{aligned} \beta_i &= y_j - y_m \\ \beta_j &= y_m - y_i \\ \beta_m &= y_i - y_j \\ \gamma_i &= x_m - x_j \\ \gamma_j &= x_i - x_m \\ \gamma_m &= x_j - x_i \end{aligned}$$

Uma vez que foi considerado que a informação da resistividade é conhecida em todos os pontos, pode-se calcular a partir da equação 4.3, a matriz de condutividade local pra cada ponto:

$$y_c = \frac{t}{4A} \begin{bmatrix} \beta_i^2 \sigma_{xx} + \gamma_i^2 \sigma_{yy} & \beta_i \beta_j \sigma_{xx} + \gamma_i \gamma_j \sigma_{yy} & \beta_i \beta_m \sigma_{xx} + \gamma_i \gamma_m \sigma_{yy} \\ \beta_i \beta_j \sigma_{xx} + \gamma_i \gamma_j \sigma_{yy} & \beta_j^2 \sigma_{xx} + \gamma_j^2 \sigma_{yy} & \beta_j \beta_m \sigma_{xx} + \gamma_j \gamma_m \sigma_{yy} \\ \beta_i \beta_m \sigma_{xx} + \gamma_i \gamma_m \sigma_{yy} & \beta_j \beta_m \sigma_{xx} + \gamma_j \gamma_m \sigma_{yy} & \beta_m^2 \sigma_{xx} + \gamma_m^2 \sigma_{yy} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Após obtidas as matrizes de condutividade locais, pode-se montar a matriz de condutividade global, baseada na influência de cada uma das matrizes locais no todo, gerando uma matriz quadrada de ordem 5.

Assim, após adquirir a matriz global podem-se calcular a partir da resistividade, os potenciais em cada ponto utilizando a equação matricial 4.7, considerando-se como conhecida a corrente no circuito.

$$[V_i] = [Cj][Y]^{-1} \quad (4.7)$$

Com:

$[Y]$: Matriz de condutividade global;

$[V_i]$: Vetor de Potencial nos nós;

$[Cj]$: Vetor de correntes.

Deve-se notar que sabendo-se a condutividade tem-se solução direta a partir do método de elementos finitos, porém, quando não existe informação sobre a distribuição de resistências na malha, o problema tem em geral muito mais incógnitas do que equações, o que torna necessário o uso de artifícios de cálculo como os já citados e algumas simplificações.

1.1.8 Software de um tomógrafo por impedância elétrica

O software empregado em um tomógrafo por impedância elétrica tem três componentes básicos, o código que soluciona o método de elementos finitos, o que controla o hardware e o que adquire as medições feitas pela placa de aquisição de sinais. Neste trabalho trataremos do controle do hardware e da aquisição de sinais.

2. Metodologia

Uma vez que a proposta do trabalho foi de construir um hardware com capacidade para colher dados a serem utilizados como informações de saída de um sistema em um problema de estimação de parâmetros, os materiais utilizados foram componentes eletrônicos, aparelhos eletrônicos e um microcomputador com uma placa de aquisição.

Foram definidos os subsistemas necessários à realização do trabalho e os testes necessários a cada um desses subsistemas e então os mesmos foram implementados. Esta seção trás a explicação da necessidade de cada um dos sistemas, bem como os testes que foram efetuados.

2.1 Subsistemas a serem desenvolvidos

O tomógrafo por impedância elétrica é baseado na medição do potencial elétrico em determinados pontos do corpo de uma pessoa, causado por sinais elétricos transmitidos e recebidos através da mesma, para construir uma bancada foi necessária a utilização de vários componentes, os principais deles estão descritos a seguir:

- **Multiplexador** - No hardware do tomógrafo, o multiplexador é o elemento responsável pelo chaveamento do sinal elétrico pelos 32 eletrodos que o compõem. Para o controle do multiplexador será a porta paralela do PC será usada através do da biblioteca Parapin.1.5.0 para o sistema linux com kernel 2.4. O sistema de Mux/DeMux será composto por 2 Mux e 2 DeMux de 16 canais cada, que chaveam o sinal elétrico da fonte elétrica entre os 32 eletrodos definindo uma entrada e uma saída.
- **Placa de controle da multiplexação** - Para o projeto foi construída uma placa simples composta por portas lógicas para evitar sobrecarga da porta LPT do PC e para diminuir em 2 pinos a necessidade de controle por software, utilizando lógica de hardware para chaveamento entre cada dupla de multiplexadores (dupla de entrada e dupla de saída de corrente).
- **Software de controle para a multiplexação** - O software de controle para a multiplexação é a interface necessária para que se faça através do software a escolha dos eletrodos que estarão ligados à fonte de corrente através dos multiplexadores. O software deve ser uma função em C, para linux que recebe como entrada o número dos eletrodos de entrada e saída e controla a porta paralela de modo que se garanta a configuração desejada, sem retornar nenhum valor ao programa principal.
- **Software para aquisição de sinais** - O software para aquisição de sinais é uma função que deve ser escrita em C para a plataforma de linux, baseado nos drivers fornecidos pelo fabricante da placa de aquisição. A função é uma função sem retorno de valor, e sem valores de entrada. O resultado da função é a criação de um arquivo de texto com 2000 dados de cada um dos canais, totalizando 64 000 dados de potencial nos eletrodos.

2.2 Materiais

- **Fonte de corrente** - É a fonte de corrente que envia um sinal elétrico conhecido e controlado através dos eletrodos, para a pele. Para o projeto a fonte e corrente foi construída a partir de 3 circuitos integrados: o gerador de onda 8038 e os amplificadores operacionais LM12CLK e o LM741. Essa fonte é alimentada com uma tensão contínua de +15V e -15V e envia uma onda senoidal com 125 kHz de frequência e potencial compatível com a resistência para emitir uma corrente constante.
- **Computador para processamento da informação** - O computador usado na aquisição de sinal é equipado com a placa de aquisição de sinal citada. A plataforma de trabalho é a Linux, para o qual já existem drivers a disposição para alguns dos hardwares. A programação será efetuada na linguagem C.
- **Recipiente para solução salina de testes (Phanton)** - Para simular um tórax é utilizado, para os primeiros testes, um recipiente construído com um tubo de PVC, uma base de vidro e 32 eletrodos de cobre colocados na lateral do recipiente, esse corpo de provas é chamado de Phanton. Dentro do recipiente será colocado uma solução salina e objetos, que deverão ser detectados pelo tomógrafo.
- **Cabos de conexão entre as placas** - Devido à grande quantidade de fiação envolvida foi necessário utilizar um cabeamento mais compacto entre as placas, viabilizando a construção. O cabeamento construído é semelhante ao utilizado em ligação nas placas mãe de computadores, porém com fiação mais robusta.
- **Eletrodos** - Os eletrodos são as interfaces entre o aparelho e o corpo. Para a Simulação nos Phantons, os eletrodos serão representados por elementos de cobre fixados em uma cuba cilíndrica de acrílico, sendo a interface entre o aparelho e a solução salina contida no Phanton.

- **Placa de aquisição de sinais** - A placa de aquisição de sinais tem a função de medir o potencial elétrico em cada um dos eletrodos e enviar a leitura em formato digital ao computador, para ser usado como condições de contorno para o método de elementos finitos. A placa usada será a placa ICS-645-32 e tem 32 canais, velocidade de aquisição de sinal de 2MHz por canal e resolução de 16 bits.
- **Fontes de tensão** - Para o trabalho foram-se utilizadas duas fontes de tensão sendo uma responsável pela alimentação da fonte de corrente e outra sendo responsável pela alimentação das placas de multiplexação e pela placa de controle da multiplexação. Para alimentação da fonte de corrente foi utilizada a fonte MPC-303DI, de marca Minipa, controlado de forma a fornecer para a fonte de corrente uma tensão contínua de +15V e -15V em relação a um terra comum. Para controlar a multiplexação foram utilizadas duas fontes de 15 volts e um regulador de tensão para 5V, tendo como saídas pontos de +15V, -15V, Terra e +5V. Essa fonte foi também usada para testes, sendo que tem várias saídas que podem ser chaveadas individualmente para 5V e Terra, criando-se uma bancada de teste de estado lógico digital 0 e 1.

3 Resultados

Como resultados, obteve-se o projeto e construção dos subsistemas, tanto de hardware como de software e algumas medições efetuadas com uma bancada montada.

O projeto eletrônico baseia-se na construção de 2 hardwares a fonte de corrente e a placa de multiplexação. A passagem de uma corrente elétrica gerada pela fonte de corrente é chaveada pelo multiplexador entre os 32 eletrodos, e retorna por algum dos outros 31 eletrodos que são chaveados através de desmultiplexadores. A tensão em cada eletrodo é então medida pela placa de aquisição de sinal e enviada ao computador, para servir de condições de contorno para o método de elementos finitos

A figura 3 ilustra o esquema de montagem elétrica de 16 dos 32 eletrodos na fonte de tensão.

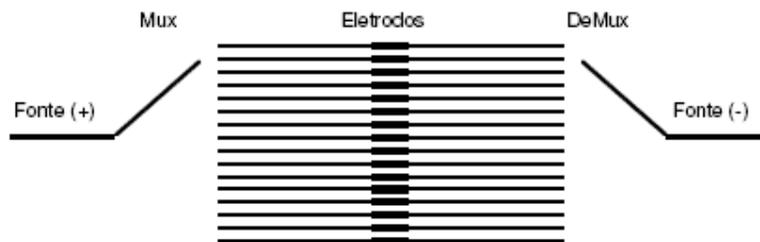


Figura 3: Modelo esquemático do Multiplexador.

Cada um dos eletrodos é ligado à placa de aquisição de dados, que é responsável por transmitir a informação do potencial elétrico de cada eletrodo ao computador que usará as informações para resolver o problema inverso do método de elementos finitos.

Os circuitos estão ligados conforme mostrado na figura 4, onde a fonte de tensão senoidal alimenta a fonte de corrente que por sua vez é direcionada a um dos eletrodos pelos multiplexadores. A corrente escoar para a terra por um dos eletrodos, que é definido pelo desmultiplexador.

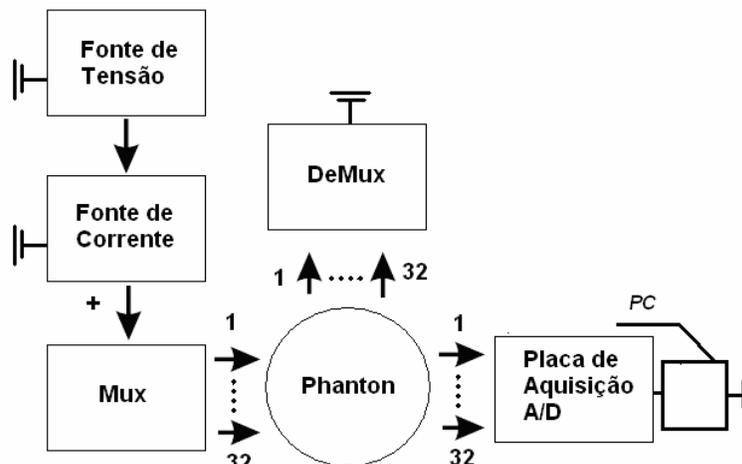


Figura 4: Esquema de montagem do hardware.

3.1 Implementação dos subsistemas de hardware

Os circuitos necessários à montagem do sistema foram baseados em alguns circuitos integrados já citados como componentes eletrônicos. São eles o CI 8038, o LM741, o LM12CLK e os Mux 535DJ.

- **Circuito do gerador de onda senoidal** - Para o projeto foi necessário construir um gerador de onda senoidal para controlar o gerador de corrente, uma vez que o mesmo é um gerador de corrente controlado por tensão. Isso foi feito utilizando um projeto baseado nas informações do Data Sheet do CI 8038 seguindo-se a configuração mostrada na figura 5.
- **Circuito de ajuste de corrente** - O amplificador operacional de alta potencia LM12CLK foi utilizado na configuração de regulador de corrente controlado por tensão mostrada na figura 5 onde a corrente é controlada por uma onda de tensão senoidal. A intensidade da corrente é controlada pela amplitude da tensão e por um potenciômetro.
- **Circuito seguidor** - Um amplificador operacional LM741 foi utilizado na configuração de seguidor para desacoplar o circuito de geração de onda do circuito de regulador de corrente. Isso foi necessário porque a impedância de entrada do circuito de regulagem de corrente é muito baixa e gera uma interferência gerando uma deformação na onda de saída do gerador de onda 8038, O circuito utilizado está mostrado na figura 5.
- **Circuito de multiplexação** - O circuito de multiplexação/demultiplexação foi construído utilizando-se 4 CIs 535DJ, dividido em 2 placas com 2 multiplexadores em cada, com 6 pinos de controle para cada uma dessas placas. Esses pinos são controlados por uma placa de controle. O circuito foi feito ligando-se os pinos de controle às entradas de controle, os pinos de V+ e V- a fontes de 15 volts, positivas ou negativas e os 32 pinos do multiplexador com uma ligação para a borneira que será a interface com os eletrodos. A lógica envolvida no controle por multiplexadores está ligada à manutenção de tensões binárias de lógica 0 para valores menores que 1,0 V e lógica 1 para valores maiores que 4,5 V. Cada um dos CIs possui 4 pinos que definem qual das 16 chaves do multiplexador será ligada à entrada, o pino “enable” que define o estado de alta impedância, ou seja desconecta todos os pinos de saída da entrada e um pino de retenção que mantém a lógica anterior enquanto o pino estiver acionado.
- **Circuito de controle para a multiplexação** - Para servir de interface entre a porta paralela do computador e o circuito de multiplexação foi preciso utilizar-se alguns artifícios para evitar uma sobrecarga da porta LPT de forma a evitar “queimar” a mesma e também foi escolhido se controlar por hardware os pinos de enable dos multiplexadores. Na maioria dos casos as portas lógicas servem apenas como um *boost* e para repetir o sinal da porta paralela, mas no caso dos pinos *enable*, o circuito faz a escolha entre uma das duas placas de cada placa de multiplexadores de acordo com um pino da placa paralela. Para controlar os 4 multiplexadores com os 10 pinos controláveis da porta paralela foi preciso utilizar lógica por hardware com o uso de circuitos integrados de lógica AND e NAND para dois propósitos o primeiro foi o de evitar uma sobrecarga na porta paralela do computador que poderia ser gerado pelo excesso de corrente que o multiplexador poderia requerer, aumentando a impedância de entrada da interface com o PC e fazer com que a corrente necessária ao multiplexador fosse gerada pelos circuitos integrados das portas lógicas. O segundo propósito foi o de chavear entre os dois multiplexadores de 16 canais sem a necessidade de 2 pinos para controle dos pinos “enable” de modo que sempre um dos pinos seja a negação do outro, diminuindo em 2 pinos a necessidade de controle pela porta paralela e possibilitando o controle por 10 pinos ao invés de 12.
- **Interface entre os circuitos** - As interfaces entre os diversos circuitos envolvidos neste trabalho se deram por meio de cabos específicos, no caso das portas paralela e da conexão da placa de aquisição, por cabos com conectores soldados entre algumas placas ou com a utilização de borneiras.

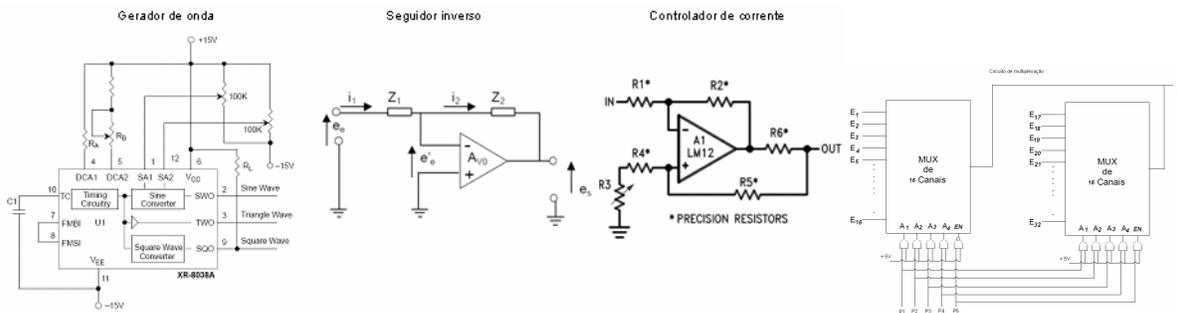


Figura 5: Circuitos de geração de onda, seguidor, controle de corrente e multiplexação utilizados

3.2 Implementação dos subsistemas de software

O software pode ser dividido em duas partes o software para controle do hardware e o software para aquisição de dados. O primeiro controla os multiplexadores, definindo os eletrodos de injeção de corrente e o segundo faz as medidas de potencial.

O software pode ser dividido nas duas partes descritas a seguir:

- **Código de controle do hardware** - O código em C recebe dois números, que indicam os eletrodos entre os quais a corrente circula e envia pelas portas paralelas uma informação que leve à ligação física dos eletrodos à fonte de corrente. Ao receber os números das portas de entrada e saída o software se encarrega de definir tanto a porta de entrada quanto a de saída. O código foi escrito para plataforma Linux com o uso da biblioteca Parapin1.5.0, utilizando como base o tutorial existente no site http://www.epanorama.net/circuits/parallel_output.html#circuithow.
- **Código para aquisição de dados** - O código para aquisição de dados da placa de aquisição foi feito baseado no driver fornecido juntamente com a placa de aquisição. Esse código registra 2000 medições feitas pela placa em uma frequência de 1 MHz para cada um dos 32 eletrodos cravados no phantom simultaneamente e tem como saída um arquivo de texto com as medições em uma coluna.

3.3 Testes do sistema completo

A bancada de trabalho foi inteiramente montada e se mostrou eficaz para a proposta, foi possível obter-se várias medições com diversos tipos de injeção de corrente e o controle pôde ser efetuado pelo computador conforme o proposto. Na figura 6 pode-se ver a bancada montada para os testes e a figura 7 mostra de forma mais clara a montagem do sistema apenas para a ilustração do trabalho.



Figura 6: Bancada utilizada para os testes

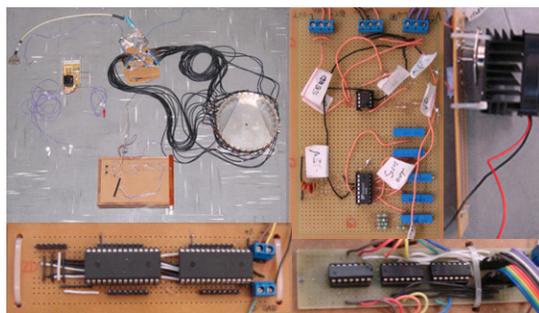


Figura 7: Sistema montado ilustrativamente e fotos ilustrativas das placas montadas.

Para se comprovar a possibilidade de se fazer uma medição utilizando-se a bancada construída e validando-se os hardwares construídos foram feitas algumas medições de potencial utilizando-se um potenciômetro e um fantom com uma solução salina.

A figura 8 mostra o gráfico obtido através da medição de potencial efetuada sobre um potenciômetro e a figura 9 mostra gráficos de medições feitas com dois pares diferentes de eletrodos. O primeiro par utilizado foi o eletrodo 1 como saída e o eletrodo 3 como entrada, já no segundo par, a entrada foi o eletrodo 16 e a saída o eletrodo 1.

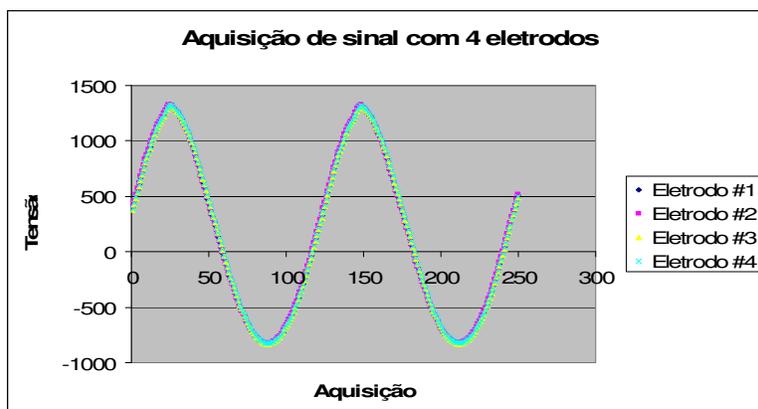


Figura 8: Medição de potencial feito em 4 canais na fonte de corrente com um potenciômetro

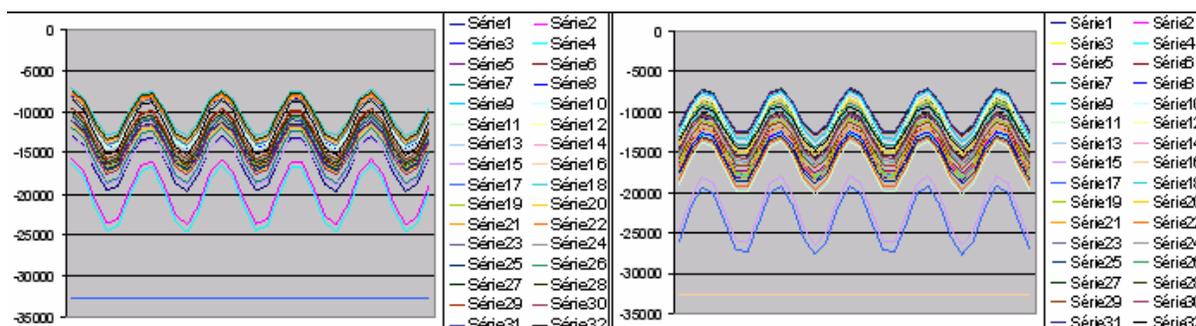


Figura 9: Resultados medido no Phantom com entrada no eletrodo 1 e saída no eletrodo 3 (esq) e para entrada no eletrodo 3 e saída no eletrodo 1 (dir).

No Gráfico das figura 9 pode-se perceber que conforme o esperado, os eletrodos mais próximos ao eletrodo de injeção de corrente reagem mais do que os eletrodos mais distantes. No caso da injeção pelo eletrodo 3, os eletrodos 4 e 2 tem medidas com maiores módulos e na caso da injeção pelo canal 15, os eletrodos 15 e 17 apresentaram maiores módulos.

5. Discussão

Mesmo que tenha sido possível obter-se um tomógrafo flexível quanto aos modos de aplicação de corrente e medição, ainda existe a possibilidade de se melhorar o hardware em diversos aspectos:

- Geração da onda senoidal;
- Offset da fonte de corrente;
- Blindagem do sistema contra interferências;
- Utilização de eletrodos ativos;
- Melhoria na eficiência do software;

A geração da onda senoidal foi feito a partir do CI 8038 na bancada atual, porém o recomendado é utilizar-se um gerador de onda comercial. No trabalho atual isso não foi possível devido ao custo envolvido estar fora do aceitável para um trabalho de graduação sem subsídios.

O offset da fonte de corrente não foi ajustada e deve ser subtraída, no momento, por software. Recomenda-se para trabalhos futuros, que se faça o ajuste por hardware, para que se possa ter um resultado já normalizado na medição, para que se possa utilizar toda a resolução da placa de aquisição.

A blindagem eletromagnética não foi feita. Com uma aterragem correta e com a colocação das placas dentro de invólucros metálicos aterrados, a interferência deve ser muito amenizada.

Recomenda-se a construção de eletrodos ativos na configuração de seguidor para aumentar a impedância de entrada e aumentar a potência do sinal. O aumento da impedância de entrada evita qualquer interferência do circuito no sistema biológico a ser monitorado e o aumento da potência do sinal faz com que as interferências externas no sinal sejam relativamente diminuídas.

A preocupação no presente trabalho, como já foi citada, foi desenvolver uma parte do hardware de um tomógrafo por impedância elétrica e não sei foi abordada a eficiência do software de controle.

6. Conclusão

Foi projetado e construído o hardware para a captura de sinais e injeção de corrente que comporá um tomógrafo por impedância elétrica, sendo programável o modo de injeção de corrente bipolar e os modos de medição diferenciais e até mesmo *single-ended*

7. Referências

- [1] Vanegas Molina, N. A. 2002, “Redução de erro numérico no filtro estendido de Kalman aplicado à tomografia por impedância elétrica”, Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, Brasil.
- [2] Mueller, J. 2007, “Electrical Impedance Tomography”, apresentação – Universidade de Colorado, Department of Mathematics, Apresentado dia 2 de maio de 2007 na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [3] Lima, C. R. 2006, “Estudo da obtenção de imagens de tomografia de impedância elétrica do pulmão pelo método de otimização topológica.”, Dissertação (Doutorado) – Escola politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, Brasil.
- [4] Lima, R. 2007, "A tomografia por impedância elétrica hoje em dia", Apresentação ao ENEBI 2007, Apresentado dia 12 de junho de 2007 na escola politécnica da Universidade de São Paulo - Escola politécnica da universidade de São Paulo, Departamento de engenharia mecânica, São Paulo, Brasil.
- [5] Logan, D.L. 1986, “A First Course in the Finite Element Method” – Boston, EUA. PWS-Kent Publishing Company.
- [6] Amato, M. B. P. 2001, “novas estratégias em Ventilação Artificial: Diagnóstico e Prevenção do Barotrauma/Biotrauma Atravs da Tomografia de Impedância Elétrica.”, Projeto Temático – Fapesp, São Paulo.
- [7] Cruvinel, P. E.; Rabello, L. M.; Mascarenhas, S.; Altafim, R.A.C., Gigante, G. E.; Staderini, E. M.; Cesareo, R., 1998. "Tomografia por impedância elétrica e seus possíveis usos na agropecuária", Centro nacional de Pesquisa e desenvolvimento de instrumentação agropecuária, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), São Carlos, SP, Brasil.
- [8] Farnell 2000, “Componentes eletrônicos”, catálogo comercial.
- [9] Lackowski, M.P. “Processamento e Análise de Imagens Médicas, aula 1 - Introdução” – Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- [10] Trigo, F. C. 2001, "Filtro estendido de Kalman aplicado a tomografia por impedância elétrica", Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, Brasil
- [11] Rutkowski, George B. 1975, “Handbook of Integrated-Circuit Operational Amplifiers” - Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

Development and Construction of an Electrical Impedance Tomography

Alvaro Yuh Yojo

balvaro@gmail.com

Abstract: This report presents the project and the development of an electrical impedance tomography to be used in lab researches. In the medical field, the electrical impedance tomography (EIT) is useful to generate images from inside the body. This method consists on applying an electrical current through the body and on measuring the contour conditions by connecting a set of electrodes to the skin. The contour conditions allow the estimation of distribution of electric impedance inside the domain.

In this project a current injection hardware, a controlling and a data acquisition softwares are presented. The hardware has 32 acquisition channels, a 125 kHz current source and electric circuits that allow the choice of the electrodes that will be used to inject the electric current.

Keywords: Tomography, Imaging (bioengineering), Finite Elements Method.