



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA DE  
CONTROLE E AUTOMAÇÃO – RELATÓRIO FINAL

# **Protótipo para ensaios não destrutivos utilizando correntes parasitas**

*Autor: Matheus Cassali da Rosa*

*Orientador: Valner João Brusamarello*

Porto Alegre, 19 de junho de 2015

## Resumo

O objetivo do trabalho é construir um protótipo para ensaios não destrutivos através da aplicação de correntes parasitas. Será concebido o projeto de um sistema de excitação de uma bobina com frequência programável. A corrente que atravessa a bobina gerará um campo magnético variante no tempo. Correntes parasitas surgirão na superfície do material analisado decorrente do campo magnético variante no tempo gerado pela bobina. A detecção das correntes parasitas será feita utilizando-se um sensor do tipo *Giant Magnetoresistive* (GMR), responsável por medir o campo magnético resultante da interação entre a corrente da bobina e as correntes parasitas fluindo na peça sob teste. Os dados são coletados por uma placa de aquisição e processados por um microprocessador previamente programado. Espera-se que o sensor GMR responda de maneira que seja possível detectar falhas que se encontram no material a ser testado. O protótipo foi validado utilizando-se uma peça metálica previamente usinada.

**PALAVRAS-CHAVE:** correntes parasitas, GMR, ensaios não destrutivos.

### Abstract

The goal of this work is to build a prototype for nondestructive tests using eddy current. It will be designed a coil drive system with programmable frequency. The current flowing through the coil generates a time-varying magnetic field. Eddy currents will emerge on the surface of the material analyzed due to the varying magnetic field generated by the coil. Detection of eddy currents is done using a GMR type sensor (Giant Magnetoresistive), responsible for measuring the resulting magnetic field generated by the coil and by eddy currents generated. A data acquisition board is used to process the acquired data. It is expected that the GMR sensor respond to the faults found in the material to be tested. The prototype was validated using a previously machined metal part.

**Key-words:** eddy current, giant magnetoresistance, nondestructive testing.

## Sumário

1	Introdução .....	8
1.1	Objetivo Geral .....	9
1.2	Objetivos Específicos.....	9
1.3	Estrutura do Trabalho .....	9
2	Revisão Bibliográfica .....	10
2.1	Correntes parasitas e Lei de Indução de Faraday .....	10
2.2	Teoria elétrica do método de inspeção por correntes parasitas .....	11
2.2.1	Fatores que afetam a resposta de correntes parasitas.....	13
2.3	Estado da Arte .....	15
3	Metodologia .....	18
3.1	Descrição geral do sistema.....	18
3.2	Bloco de excitação.....	18
3.3	Bloco de medição .....	20
3.4	Bloco de processamento de dados .....	24
3.5	Inspeção .....	26
4	Resultados .....	28
4.1	Resultados de inspeção.....	29
5	Conclusão .....	35
6	Referências.....	36
7	Anexos.....	37
7.1	Bobina de excitação .....	37
7.2	Filtro passa-baixas .....	37
7.3	Código em C .....	38

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Correntes parasitas surgindo em uma placa condutora sendo levada para fora de uma região com campo magnético.....	10
Figura 2.2 - Campo elétrico induzido sob um condutor elétrico em uma região onde há fluxo magnético variante (adaptada de Halliday, 2008). .....	11
Figura 2.3 - Correntes parasitas são afetadas pela presença da falha (adaptado de J. Hansen, 2004). .....	12
Figura 2.4 - Circuito que mostra o princípio básico do método por correntes parasitas (adaptado de J. Hansen, 2004).....	12
Figura 2.5 - Falhas devem interromper o fluxo de correntes parasitas para serem detectadas (adaptado de J. Hansen, 2004).....	13
Figura 2.6 - Profundidade padrão de penetração (adaptado de J. Hansen, 2004). .....	14
Figura 2.7 - O efeito da frequência na profundidade padrão de penetração (adaptado de J. Hansen, 2004). .....	15
Figura 2.8 - Diagrama de blocos do conjunto experimental para sondagem materiais que contém falhas geométricas superficiais (adaptada de T. Dogaru e S. T. Smith, 2001).....	16
Figura 2.9 - Mudança da tensão induzida devido a falha (adaptado de M. Smetana et al., 2010). .....	16
Figura 2.10 – Bobina com sensor GMR (Adaptado de R. W. Porto et al., 2013).....	17
Figura 3.1 - Descrição geral do sistema.....	18
Figura 3.2 - Fonte de Howland para excitação senoidal (resistores em ohms, indutores em henry e capacitores em farad). .....	19
Figura 3.3– Circuito de geração de formas de ondas (adaptado de Porto, R.W., 2008). .....	19
Figura 3.4– Filtro passa-altas e amplificador. ....	20
Figura 3.5 - Bobina de excitação com o sensor GMR.....	21
Figura 3.6 - Tensão de saída do AAL 002-02. Adaptado de (Non Volatile Electronics Corp., 2003). .....	21
Figura 3.7- Conexões do amplificador de instrumentação INA125. ....	22
Figura 3.8 – Filtro passa-baixas Sallen-Key de terceira ordem. ....	23
Figura 3.9 – Resposta em frequência do filtro passa-baixas.....	23
Figura 3.10– Conexões do Arduino para realizar a comunicação. ....	24
Figura 3.11 – Conexão do circuito de medição ao Arduino. ....	25
Figura 3.12 – Fluxograma do programa executado pelo Arduino. ....	25
Figura 3.13 – Placa metálica a ser inspecionada. Cortes superficiais estão circulos em amarelo. ....	26
Figura 3.14 – Linhas em que foram feitas inspeções à mão. ....	27
Figura 3.15 – Robô da empresa Stäubli.....	27
Figura 4.1 – Sinal $V_{dds}$ para diversas frequências. ....	28
Figura 4.2 – Resposta do sensor GMR.....	29
Figura 4.3 – Falhas a serem detectadas no corpo de prova.....	29
Figura 4.4 – Resposta do sensor GMR para as linhas 1, 2, 3 e 4, nesta ordem.....	30
Figura 4.5 – Resposta do sensor GMR para as linhas 5, 6, 7, 8 e 9, nesta ordem.....	31
Figura 4.6 – Inspeção sendo feita pelo robô Stäubli. ....	32
Figura 4.7– Inspeção das linhas 5, 6, 7, 8 e 9, respectivamente, utilizando o robô Stäubli.....	33

Figura 7.1 – Detalhes construtivos da bobina de excitação.....	37
Figura 7.2 – Filtro RC. ....	37
Figura 7.3 – Filtro Sallen-Key de segunda ordem.....	38

## Lista de Símbolos

$B$  – Campo magnético (Densidade de Fluxo Magnético), em T

$\mathcal{E}$  - Força eletromotriz, em V

$\Phi_B$  – Fluxo magnético, Wb

$\vec{E}$  - Campo elétrico, em V/m

$\rho$  - Resistividade elétrica específica, em  $m\Omega.cm$

$f$  - Frequência, em Hz

$\mu_r$  – Permeabilidade relativa

$e$  – Número de Euler

$\delta$  - Profundidade padrão de penetração, em mm

$V_{ina}$  - Tensão de saída do amplificador INA125, em V

$I_{A_{REF}}$  - Corrente de referência do amplificador INA125, em A

$L$  - Indutância, em H

$N$  - Número de espiras da bobina

$I$  – Corrente elétrica, em A

$V_{dds}$  - Tensão de saída do circuito DDS, em V

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

NDT – *Nondestructive Testing* – Ensaio Não Destrutivo

ECT – *Eddy Current Testing* – Ensaio por Correntes Parasitas

PEC – *Pulsed Eddy Current* – Ensaio por Correntes Parasitas Pulsadas

GMR – *Giant Magnetoresistance*

## 1 Introdução

Materiais e produtos são frequentemente testados antes de serem entregues ao usuário para se assegurar de que eles vão corresponder às expectativas e que durarão conforme condições especificadas. Atualmente, entende-se que o controle de qualidade precisa começar pela matéria-prima e deve ocorrer durante todo o processo de produção, incluindo a inspeção e os ensaios finais nos produtos acabados. Em *Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing* (Jack Blitz, 1997) denomina-se ensaio destrutivo qualquer tipo de ensaio no qual o corpo de prova fique inutilizado após a realização do mesmo, ou seja, ocorram alterações permanentes nas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais. O ensaio de tração, por exemplo, que é um dos métodos mais comuns de ensaios mecânicos destrutivos, é utilizado para determinar o módulo de Young de um material. O módulo de Young, também chamado de módulo de elasticidade, é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido. Neste ensaio, o corpo de prova sofre uma tensão que tende a alongá-lo ou esticá-lo até que ocorra a deformação plástica e a fratura. Em contrapartida, é essencial que qualquer ensaio feito em um produto planejado para ter um uso futuro mantenha integridade, propriedades e desempenho do mesmo. Conforme Blitz (1997), qualquer técnica utilizada sob essas condições é chamada de ensaio não destrutivo.

Em diversas circunstâncias ensaios periódicos são necessários não apenas no estágio de manufatura, mas também em específicos intervalos durante o funcionamento. Análises devem ser feitas em regiões críticas de componentes utilizados nas indústrias aeronáutica, nuclear e química. Estruturas e componentes podem estar sujeitos a cargas excessivas, corrosão e fadiga. Defeitos como fissuras podem se formar e crescer a ponto de causar colapso em alguma estrutura, com possíveis consequências desastrosas.

Um dos métodos de ensaios não destrutivos mais utilizados é o método ultrassônico. Segundo Blitz e Simpson (1996), o método ultrassônico consiste na propagação de ondas ultrassônicas de pequenas amplitudes ao longo do material para medir tanto o tempo que a onda leva para percorrer o material quanto qualquer mudança de intensidade para uma dada distância. Aplicações incluem medição de distância, detecção de falhas e medição de propriedades características, tais como módulo de elasticidade e tamanho de grão, que estão relacionados à estrutura do material.

As propriedades elétricas e magnéticas dos materiais compreendem permeabilidade magnética, condutividade elétrica e permissividade elétrica. Essas propriedades estão fortemente relacionadas às propriedades mecânicas dos materiais. Portanto, resistência mecânica, dureza e presença de defeitos e impurezas dos materiais podem ser detectadas por ensaios não destrutivos que fazem uso de suas propriedades elétricas e magnéticas.

No ensaio por partículas magnéticas observa-se o campo magnético dos materiais ferromagnéticos que, pelo comportamento das partículas, pode-se identificar características dos materiais e a possibilidade de determinação de falhas. Os



materiais podem ser classificados de acordo com a permeabilidade magnética e com a facilidade de serem magnetizados. Por isso o ensaio só pode ser feito em materiais ferromagnéticos.

Correntes parasitas, também chamadas de Correntes de Foucault, surgem a partir da variação do campo magnético gerado em um corpo por alguma fonte externa. A análise dessas correntes origina uma técnica de inspeção não destrutiva. Uma aplicação importante é como método de identificação de defeitos em materiais. É possível citar a capacidade de detectar falta de homogeneidade, tal como trincas, deformações, inclusões, variações de espessura, medir espessura ou variação de espessura de camada de recobrimento, localizar variações associadas à condutividade do material, falta de homogeneidade em ligas, superaquecimento local, erros de tratamento térmico e também detectar variações associadas à permeabilidade magnética através de medição da intensidade dos campos magnéticos.

### **1.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho é construir um protótipo para ensaios não destrutivos através da aplicação de correntes parasitas para detecção de falhas em materiais condutores elétricos.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Concepção de um projeto de um sistema para excitação de uma bobina de excitação com frequência programável,
- Detecção das correntes parasitas por meio de um sensor magnético do tipo GMR (*Giant Magnetoresistive*),
- Validação do protótipo em uma placa metálica previamente usinada,
- Processamento do sinal adquirido.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

No primeiro capítulo, são apresentados o texto introdutório, o objetivo geral e os objetivos específicos.

No segundo, a revisão bibliográfica é feita. Primeiro, é lembrada a Lei de Faraday e como, a partir dela, é explicado o surgimento de correntes parasitas. Segundo, são mostrados os diferentes fatores que influenciam as correntes parasitas. Terceiro, os principais artigos na área que serviram de base para este trabalho.

No terceiro capítulo, é apresentado um resumo da metodologia empregada neste trabalho. No quarto capítulo são apresentados os resultados do trabalho realizado. No quinto capítulo, conclusões e uma pequena reflexão sobre trabalhos futuros.

## 2 Revisão Bibliográfica

Nesta seção são apresentadas as bases necessárias para se entender a origem das correntes parasitas, assim como trabalhos na área de ensaios não destrutivos por correntes parasitas e seus correlatos.

### 2.1 Correntes parasitas e Lei de Indução de Faraday

Suponha uma placa condutora maciça mergulhada em uma região onde existe um campo magnético constante  $B$ . Suponha também que uma força externa  $F$  empurra a mesma placa para fora da região onde existe o campo magnético. Quando a mencionada força externa empurra a placa para fora da região, o movimento relativo entre o campo e o condutor induz uma corrente no condutor, conforme a Figura 2.1. Assim, surge uma força que se opõe ao movimento. Portanto, a força externa precisa realizar um trabalho por causa da corrente induzida que circula no interior da placa. A corrente induzida que circula no interior da placa é chamada de corrente parasita. As correntes parasitas também são conhecidas como Correntes de Foucault, por terem sido observadas pela primeira vez pelo físico francês Jean Bernard Léon Foucault, no século XIX (W. Tobin, 2003).

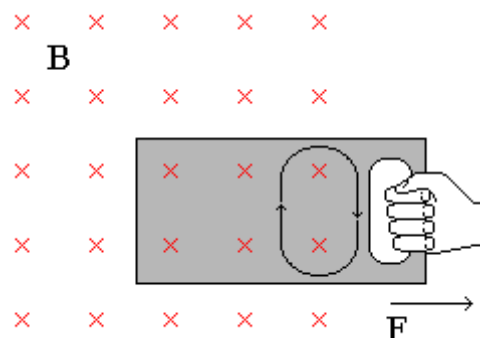


Figura 2.1 - Correntes parasitas surgindo em uma placa condutora sendo levada para fora de uma região com campo magnético.

O surgimento das correntes parasitas pode ser explicado através da lei de Faraday:

$$\mathcal{E} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}, \quad (2.1)$$

onde  $\mathcal{E}$  é força eletromotriz em volts, e  $\Phi_B$  é fluxo magnético em webers. A lei de Faraday diz que o módulo da força eletromotriz induzida em uma espira condutora é igual à taxa de variação com o tempo do fluxo magnético que atravessa a espira. No entanto, no caso descrito as correntes são induzidas em uma placa plana maciça, não em uma espira. A lei de Faraday também pode assumir a seguinte forma integral:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}. \quad (2.2)$$

Nessa forma, a força eletromotriz induzida é a soma, por integração, do produto escalar  $\vec{E} \cdot d\vec{s}$ , onde  $\vec{E}$  é o campo elétrico induzido pela variação do fluxo magnético e  $d\vec{s}$  é o elemento de comprimento ao longo da curva de integração. A lei de Faraday, na forma da Equação (2.2), pode ser aplicada a qualquer curva fechada que possa ser traçada em uma região onde existe fluxo magnético variável. Assim é possível aplicar a lei de Faraday para o caso descrito anteriormente, ilustrado na Figura 2.1.

É importante deixar claro que os campos elétricos induzidos não são produzidos por cargas elétricas, e sim por fluxos magnéticos variáveis. Embora os campos elétricos produzidos exerçam forças sobre partículas carregadas, existem diferenças importantes entre eles. A diferença mais óbvia é o fato de que as linhas de campo dos campos elétricos induzidos formam curvas fechadas, como na Figura 2.2. As linhas de campo produzidas por cargas estáticas não formam curvas fechadas, pois sempre começam em uma carga positiva e terminam em uma carga negativa.



Figura 2.2 - Campo elétrico induzido sob um condutor elétrico em uma região onde há fluxo magnético variante (adaptada de Halliday, 2008).

O campo elétrico induzido exerce uma força sobre as partículas carregadas na placa condutora, fazendo com que essas partículas se movam pela placa, gerando as correntes parasitas.

## 2.2 Teoria elétrica do método de inspeção por correntes parasitas

Quando uma corrente alternada flui através de uma bobina próxima a uma superfície condutora, o campo magnético gerado pela bobina induz correntes parasitas nessa superfície. A magnitude e a fase das correntes parasitas afetarão a carga na bobina, e, portanto, sua impedância. Como exemplo, a Figura 2.3 apresenta um caso genérico em que há uma pequena rachadura na superfície de um metal logo abaixo da bobina de excitação.

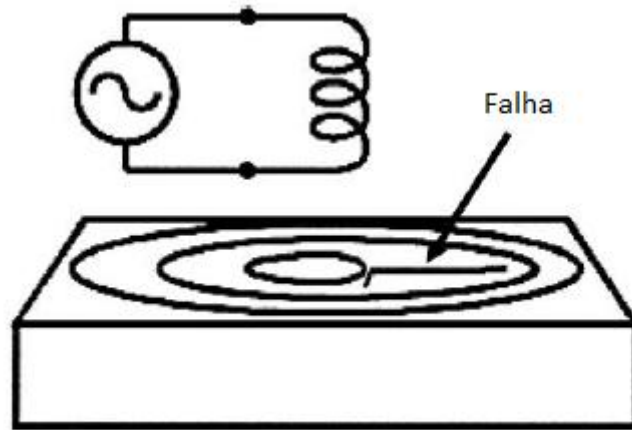


Figura 2.3 - Correntes parasitas são afetadas pela presença da falha (adaptado de J. Hansen, 2004).

A rachadura interrompe ou reduz o fluxo de correntes parasitas, diminuindo a carga na bobina e aumentando a sua impedância efetiva. Essa é a base do método de inspeção por correntes parasitas. Monitorando a tensão na bobina, pode-se detectar falhas em materiais condutores.

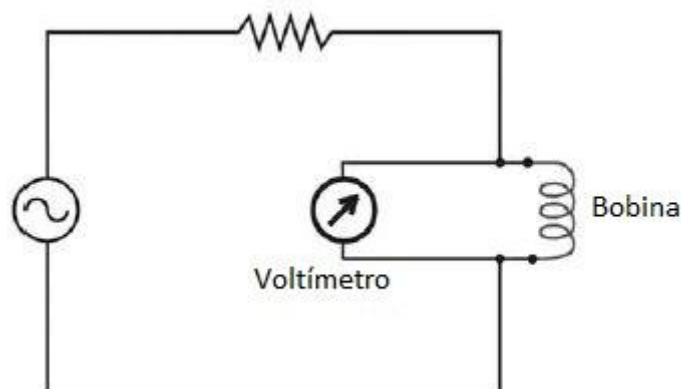


Figura 2.4 - Circuito que mostra o princípio básico do método por correntes parasitas (adaptado de J. Hansen, 2004).

As falhas no material devem interromper o fluxo de correntes parasitas para serem detectadas. Falhas paralelas ao caminho das correntes não geram uma resistência significativa e podem não ser detectadas.

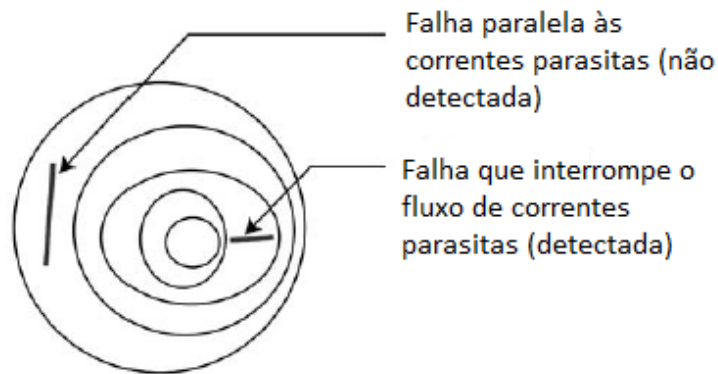


Figura 2.5 - Falhas devem interromper o fluxo de correntes parasitas para serem detectadas (adaptado de J. Hansen, 2004).

### 2.2.1 Fatores que afetam a resposta de correntes parasitas

Vários fatores, não relacionados às falhas, afetam a resposta das correntes parasitas. A avaliação bem sucedida de falhas, assim como qualquer destes fatores, depende de manter os outros fatores constantes, ou, de algum modo, eliminar o seus efeitos sobre os resultados. É esta eliminação de respostas indesejadas que serve de base para a tecnologia de inspeção por correntes parasitas. Os principais fatores estão descritos a seguir.

#### 2.2.1.1 Condutividade do material

A condutividade do material tem um efeito direto no fluxo das correntes parasitas: quanto maior a condutividade do material, maior o fluxo de correntes parasitas em sua superfície. Condutividade é frequentemente medida por alguma técnica baseada em correntes parasitas, e inferências podem ser feitas sobre diferentes fatores, tais como a composição material, tratamento térmico, encruamento, entre outros.

#### 2.2.1.2 Permeabilidade Magnética

Esta grandeza pode ser descrita como a facilidade com que um material pode ser magnetizado. Para metais não ferrosos, como cobre, alumínio, etc., e aços inoxidáveis, a permeabilidade é a mesma do vácuo, logo a permeabilidade relativa ( $\mu_r$ ) destes materiais é igual a um. Para metais ferrosos, entretanto, o valor de  $\mu_r$  pode ser de algumas centenas, e este fator tem uma influência significativa na resposta das correntes parasitas. Além disso, não é incomum que a permeabilidade varie drasticamente num mesmo metal, devido à tensão localizada, efeitos térmicos, etc.

#### 2.2.1.3 Geometria

Características como curvatura, bordas, sulcos, etc. afetam a resposta das correntes parasitas. Técnicas de ensaios devem reconhecer estes fatores para retirar a influência dos mesmos na resposta das correntes parasitas. Por exemplo, quando se examina uma borda, a sonda deve se mover paralelamente à borda para que pequenos defeitos não passem despercebidos.

#### 2.2.1.4 Profundidade de penetração

A densidade de correntes parasitas, logo a energia de uma resposta de uma falha, é maior na superfície do material examinado e diminui com a profundidade. É definido como “profundidade padrão de penetração” onde a magnitude das correntes parasitas é de  $1/e$  (37%) do valor na superfície (ver Figura 2.6).

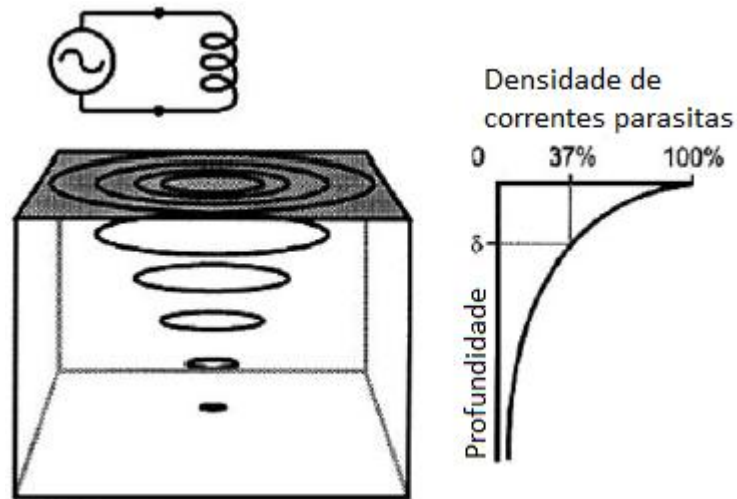


Figura 2.6 - Profundidade padrão de penetração (adaptado de J. Hansen, 2004).

A profundidade padrão de penetração, em mm, é dada pela equação

$$\delta = 50 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (2.3)$$

onde  $\rho$  é resistência eléctrica específica em  $m\Omega.cm$ ,  $f$  é a frequência em Hz. A partir da Equação (2.3) conclui-se que a profundidade de penetração:

- Diminui com o aumento da frequência,
- Diminui com o aumento da condutividade,
- Diminui com o aumento da permeabilidade magnética.

O gráfico da Figura 2.7 mostra o efeito da frequência na profundidade padrão de penetração.

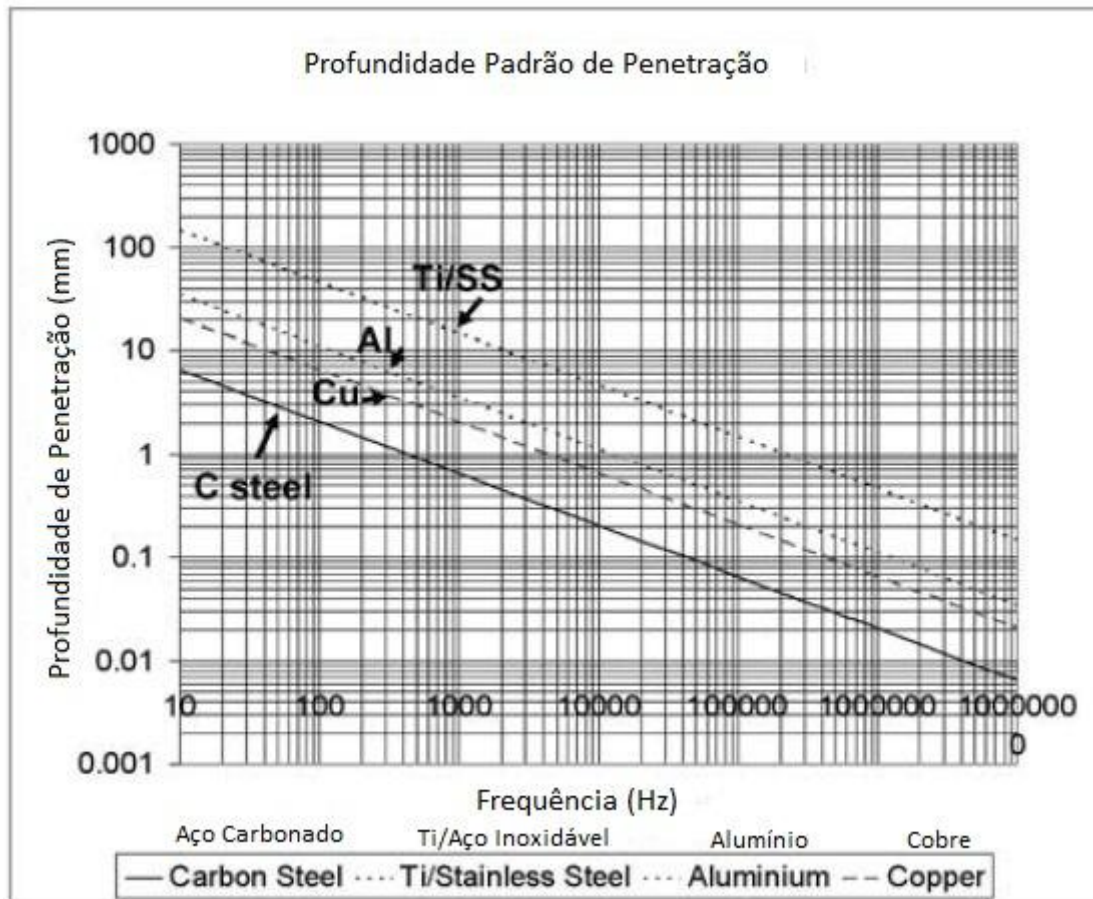


Figura 2.7 - O efeito da frequência na profundidade padrão de penetração (adaptado de J. Hansen, 2004).

Também é comum falar sobre a “profundidade efetiva de penetração” geralmente definida como três vezes a profundidade padrão de penetração, onde a densidade de correntes parasitas é igual a 5% do seu valor de superfície. Esta é a profundidade em que é considerada como não tendo qualquer influência sobre o campo de correntes parasitas.

### 2.3 Estado da Arte

Em T. Dogaru e S. T. Smith, 2001, é proposta uma técnica de ECT (*Eddy Current Testing*, Ensaio por Correntes Parasitas) para detecção de falhas em superfícies e regiões próximas à superfície em metais não magnéticos utilizando sensores GMR. A maioria das pesquisas realizadas utilizando sensores magneto resistivos foi focada na detecção de falhas de profundidade, que é um problema crítico na inspeção de estruturas de aeronaves. O trabalho citado aborda um problema diferente: detectar pequenas falhas superficiais em materiais condutores elétricos. Tal abordagem é de importância para diversas aplicações, tais como detecção de fendas produzidas por fadiga em seus estágios iniciais. Um diagrama esquemático do conjunto experimental é mostrado na Figura 2.8.

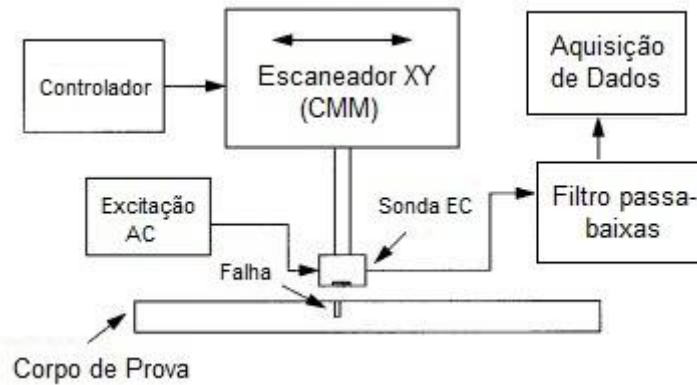


Figura 2.8 - Diagrama de blocos do conjunto experimental para sondagem de materiais que contém falhas geométricas superficiais (adaptada de T. Dogaru e S. T. Smith, 2001).

Uma fonte de corrente senoidal fornece corrente para a bobina de excitação de amplitude controlada (até 3 amperes) e frequência controlada (entre 1 e 100 kHz). A sonda de ECT, composta pela bobina e o sensor GMR alinhado em seu eixo, examina o plano da superfície do material sob inspeção, fazendo uso de uma *Coordinate Measuring Machine* (CMM), ou Máquina de Medição Coordenada. Concluiu-se que o modelo de sonda ECT projetada neste trabalho permite a localização das falhas e a estimativa do comprimento das mesmas.

Em M. Smetana et al., 2008, é proposto um método de inspeção que excita a bobina com corrente de forma pulsada, ao invés do uso de corrente harmônica. O método de ECT que usa corrente pulsada como excitação é chamado de *Pulsed Eddy Current Testing* (PEC). As principais características de um método ECT com excitação harmônica são os seguintes:

- Aplicação de frequências discretas,
- Dimensionamento de falha preciso e
- Análise de sinal por reconhecimento de padrões.

A presença de uma falha no material sob inspeção afeta a amplitude e a fase do campo eletromagnético e, portanto, a tensão induzida na bobina (Figura 2.9).

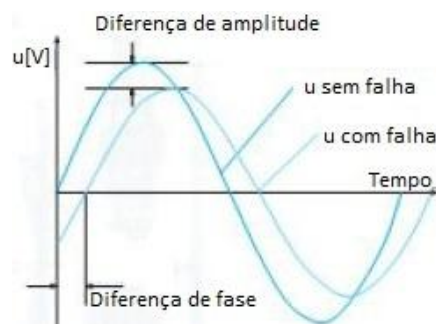


Figura 2.9 - Mudança da tensão induzida devido a falha (adaptado de M. Smetana et al., 2010).



Sistemas convencionais de correntes parasitas que utilizam excitações harmônicas são limitados a um número pequeno de frequências discretas para permitir uma velocidade maior de análise e, apesar do advento dos sistemas de análise automatizada, o modo principal de análise é por reconhecimento de padrões. Sistemas convencionais de ECT tem dificuldade em encontrar falhas na presença de arestas de camada e lacunas e, também, degradação de sinais de baixa frequência.

Devido à inspeção em múltiplas frequências, um maior número de informações complexas sobre a falha do material pode ser obtido. Análise por PEC é baseada na aplicação de um pulso de banda larga e analisa a resposta transiente da tensão, que pode produzir um sinal com conteúdo em frequências até 100 kHz ou mais. Como a profundidade de penetração depende da frequência de excitação, a análise por PEC provê um volume maior de informação.

Em Porto et al., 2013, uma sonda de correntes parasitas para ensaios não destrutivos baseada em sensor GMR é projetada e analisada. Ao invés de se observar a tensão na bobina de excitação para analisar o comportamento das correntes parasitas, um sensor GMR é posicionado no centro da bobina para medir o campo magnético gerado pelas correntes parasitas. Com a sonda projetada, foi proposto um método para realizar a caracterização das falhas no corpo de prova.

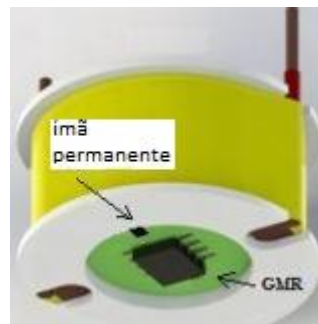


Figura 2.10 – Bobina com sensor GMR (Adaptado de R. W. Porto et al., 2013).

### 3 Metodologia

Nesta seção será descrito o sistema de medição de falhas como um todo. Depois, cada bloco do sistema será explicado individualmente. Após toda a descrição do sistema, um método de estimação das falhas a partir dos dados gerados pelo sistema será demonstrado.

#### 3.1 Descrição geral do sistema

O sistema geral pode ser separado em três blocos. O primeiro é o bloco de excitação, que consiste em uma fonte de corrente alternada para que a bobina gere campo magnético variável sobre a peça a ser inspecionada. A forma alternada da fonte de corrente é feita pelo circuito integrado AD9834, baseado em DDS (*Direct Digital Synthesis*). O bloco de medição é composto por um sensor GMR (*Giant magnetoresistive*) AAL002-02 com ímã permanente de neodímio que permite o ajuste do ponto de operação do sensor, como mostrado em G. Betta et al., 2012, e um circuito de tratamento de sinal. O sinal de saída do sensor é conectado em um amplificador de instrumentação INA125. Depois, o sinal é tratado e filtrado por um filtro passa-baixas. Uma inspeção é realizada, movimentando a sonda manualmente através de linhas demarcadas sobre o corpo de prova. Neste ensaio, os dados são adquiridos por osciloscópio. Um segundo ensaio é feito utilizando um robô Stäubli, anexando a bobina de excitação e o sensor GMR ao efetuador do robô para a ação de inspeção, garantindo exatidão de posicionamento, e utilizando uma placa de aquisição de dados Arduino, baseada em um microprocessador ATmega. O controle de posição desse arranjo é feito a partir da interface de programação da própria máquina.

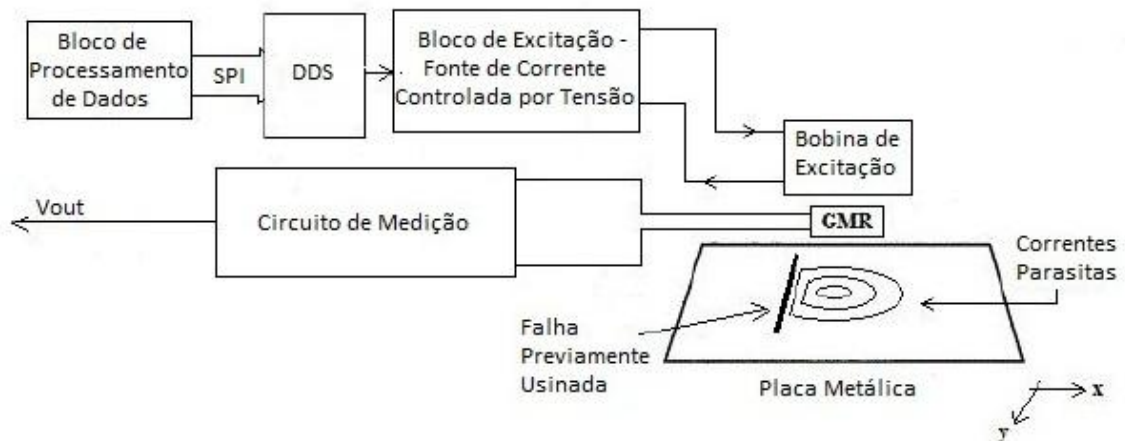


Figura 3.1 - Descrição geral do sistema.

#### 3.2 Bloco de excitação

Como dito anteriormente, o bloco de excitação é composto por uma bobina, uma fonte de corrente encarregada de excitar a bobina e o circuito AD9834. O bloco de excitação conta com uma fonte de Howland adaptada. A fonte de Howland é controlada por tensão e é bidirecional, produzindo corrente em dois sentidos.

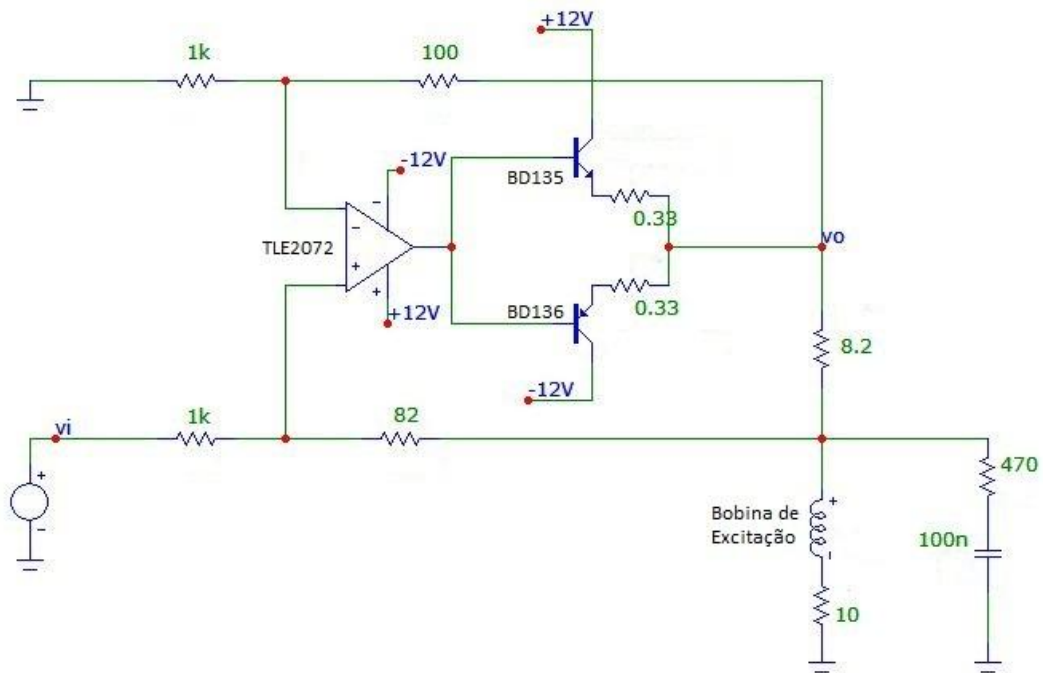


Figura 3.2 - Fonte de Howland para excitação senoidal (resistores em ohms, indutores em henry e capacitores em farad).

Um circuito baseado no circuito integrado AD9834 foi utilizado para gerar a tensão de controle da fonte de Howland (Porto, R.W., 2008). O AD9834 é um dispositivo utilizado para gerar formas de onda senoidais e triangulares. Para configurar este dispositivo, é necessário programá-lo utilizando interface SPI (*Serial Peripheral Interface*). Para este fim, ele é conectado ao bloco de processamento de dados.

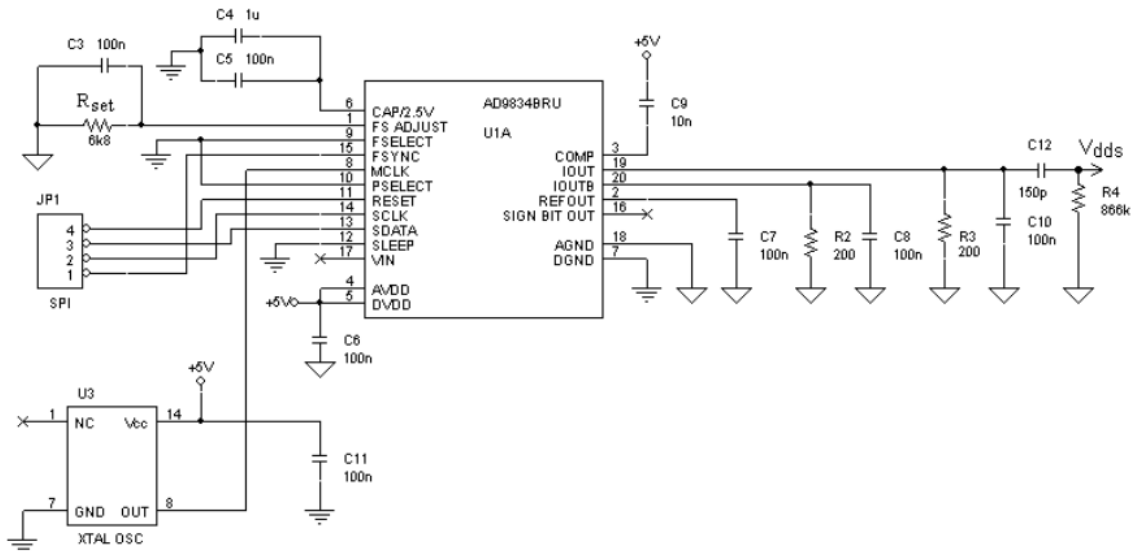


Figura3.3– Circuito de geração de formas de ondas (adaptado de Porto, R.W., 2008).

O capacitor C12 mostrado na Figura 3.4 serve para filtrar o sinal constante proveniente da saída do AD9834. Como a saída do circuito pode conter uma parcela de

sinal constante devido a tensões de offset dos operacionais, um filtro passa-altas é utilizado, associado a um circuito amplificador de ganho ajustável por potenciômetro.

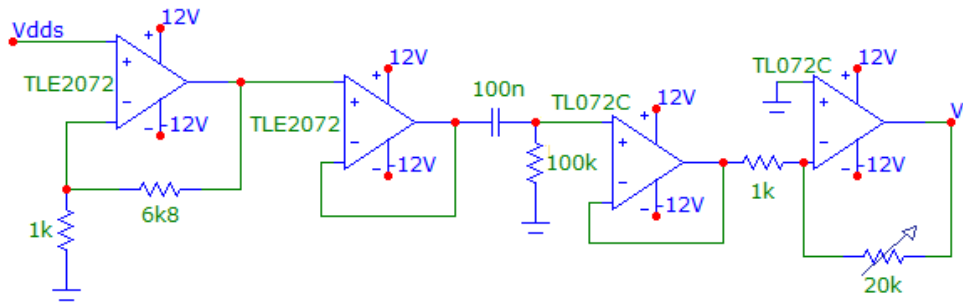


Figura3.4– Filtro passa-altas e amplificador.

Para a fonte de Howland, o valor da corrente na carga é proporcional ao valor da tensão de entrada da fonte. O potenciômetro da Figura 3.4 foi adicionado com a intenção de controlar o valor da corrente na carga. Os amplificadores operacionais utilizados foram o TLE2072 e o TL072 porque possuem excelente resposta em frequência, o que é interessante, pois o objetivo é fazer com que a fonte de corrente atinja a frequência de 10kHz sem perder magnitude. Em (Porto, R.W., 2013), uma densidade de fluxo magnético de amplitude de 5,18 mT é utilizada para a geração de correntes parasitas. Sabemos que indutância é definida pela Equação (3.1)

$$L = \frac{N\Phi_B}{I}, \quad (3.1)$$

sendo  $L$  a indutância da bobina,  $I$  a corrente elétrica que a percorre e  $N$  o número de espiras. Considerando o fluxo magnético o produto entre a densidade de fluxo magnético e a área da bobina, temos:

$$L = \frac{NBA}{I} = \frac{NB\pi a^2}{I}, \quad (3.2)$$

sendo  $A$  a área da seção transversal da bobina, e  $a$  o raio médio da bobina. Medindo em ponte para medição RLC Agilent U1733C a bobina utilizada, obtém-se  $L = 5,18$  mH. Sabendo que  $a = 9,4$  mm e  $N = 600$ , resolvemos (3.2) para  $I$ , obtendo 0,16 A.

### 3.3 Bloco de medição

O sensor AAL002-02 consiste em quatro elementos GMR arranjados de modo a formar uma ponte de Wheatstone. O sensor GMR foi posicionado no centro da bobina, conforme a Figura 3.5.

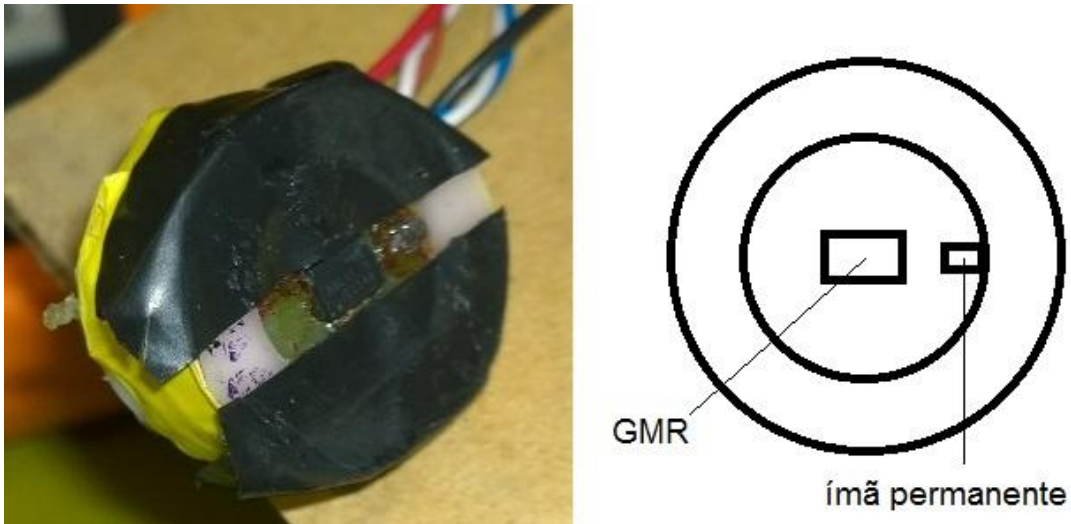


Figura 3.5 - Bobina de excitação com o sensor GMR.

Entretanto, o sensor é sensível a campos magnéticos perpendiculares a este eixo. Esse arranjo permite detectar campos magnéticos gerados pelas correntes parasitas na superfície dos materiais em ensaio e seus distúrbios gerados por falhas nestes materiais. A tensão de saída do sensor GMR pode ser vista na Figura 3.6. Pode-se notar que há uma região de operação (entre -1 e 1 mT) em que o comportamento do sensor pode ser considerado linear.

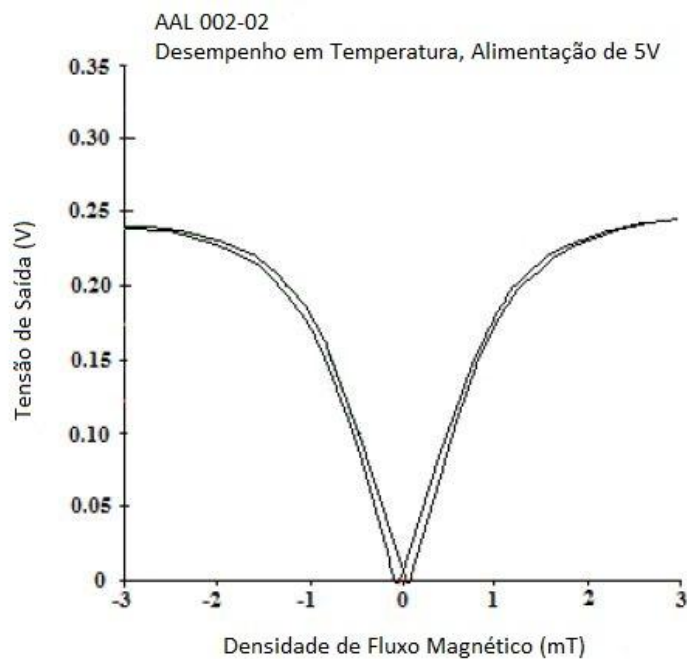


Figura 3.6 - Tensão de saída do AAL 002-02. Adaptado de (Non Volatile Electronics Corp., 2003).

Um condicionador de sinal foi projetado e montado para alimentar o AAL002-02 com uma tensão de referência estabilizada para aumentar a sensibilidade com o amplificador de instrumentação INA125. A Figura 3.7 mostra o esquemático elétrico do circuito.

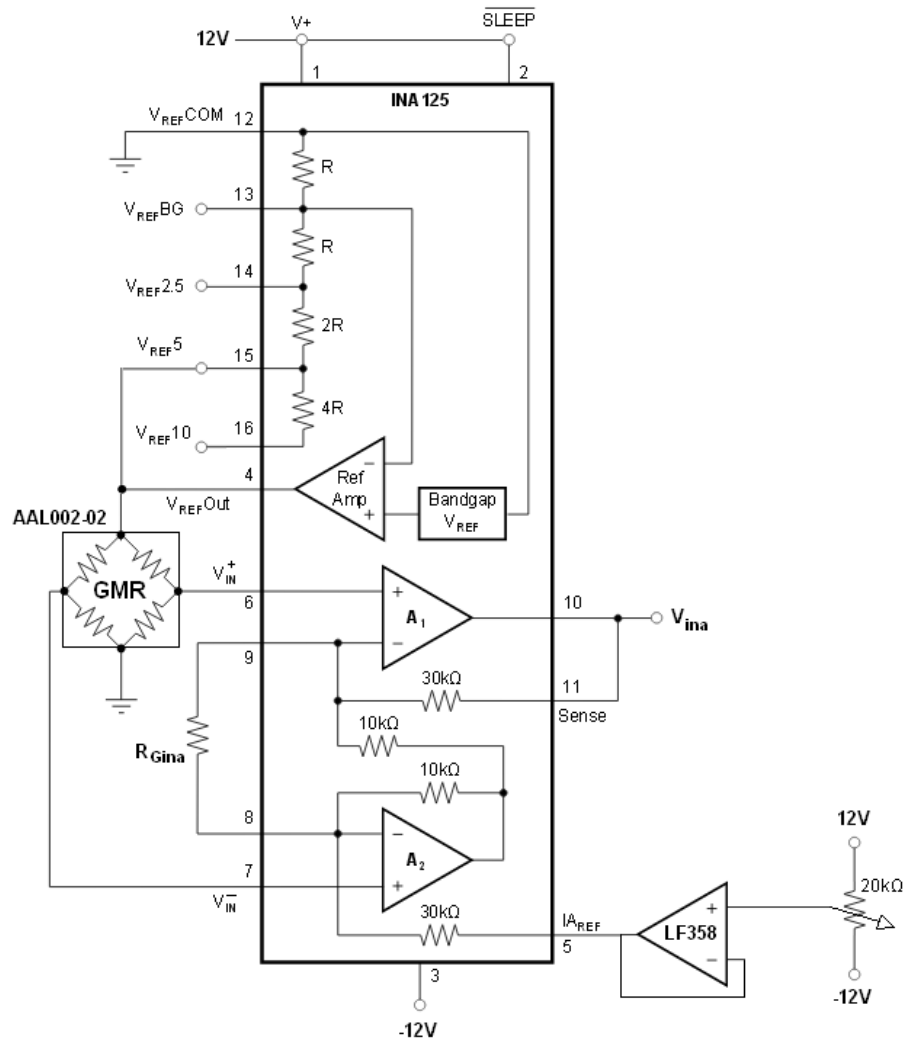


Figura 3.7- Conexões do amplificador de instrumentação INA125.

Segundo o catálogo do componente INA125, a relação entre  $V_{ina}$  e a tensão de saída do AAL002-02 é dada por:

$$V_{ina} = \left(4 + \frac{60k\Omega}{R_{Gina}}\right) \cdot f_{GMR}(B) \quad (3.3)$$

onde  $f_{GMR}(B)$  é a tensão de saída do sensor AAL002-02 em função do campo magnético  $B$  sobre ele estimada na Figura 3.6, e  $R_{Gina}$  é um resistor de ganho. Para garantir uma boa excursão de sinal na saída do circuito de medição, o ganho utilizado foi de 84, o suficiente para que seja possível a detecção das falhas. Portanto,  $R_{Gina}$  pode ser calculado a partir da Equação (3.1):

$$R_{Gina} = \frac{60k\Omega}{84 - 4} = 750\Omega.$$

O circuito conectado ao pino  $IA_{REF}$  serve para ajuste de *offset* da tensão de saída do INA125.

A saída do amplificador INA125 é conectada a um filtro passa-baixas Sallen-Key de terceira ordem, mostrado na Figura 3.8. O sensor GMR funciona como um retificador de onda completa, pois, como se pode ver na Figura 3.6, sua resposta é sempre positiva, independentemente do sinal do campo magnético sobre ele no momento analisado. Portanto, o filtro serve para obter um sinal constante proporcional à amplitude do sinal de resposta do sensor GMR, logo proporcional à magnitude do campo magnético senoidal resultante.

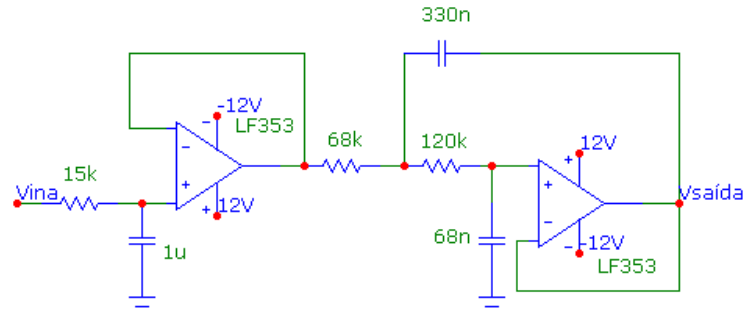


Figura 3.8 – Filtro passa-baixas Sallen-Key de terceira ordem.

Este circuito foi simulado e sua resposta em frequência é a apresentada na Figura 3.9.

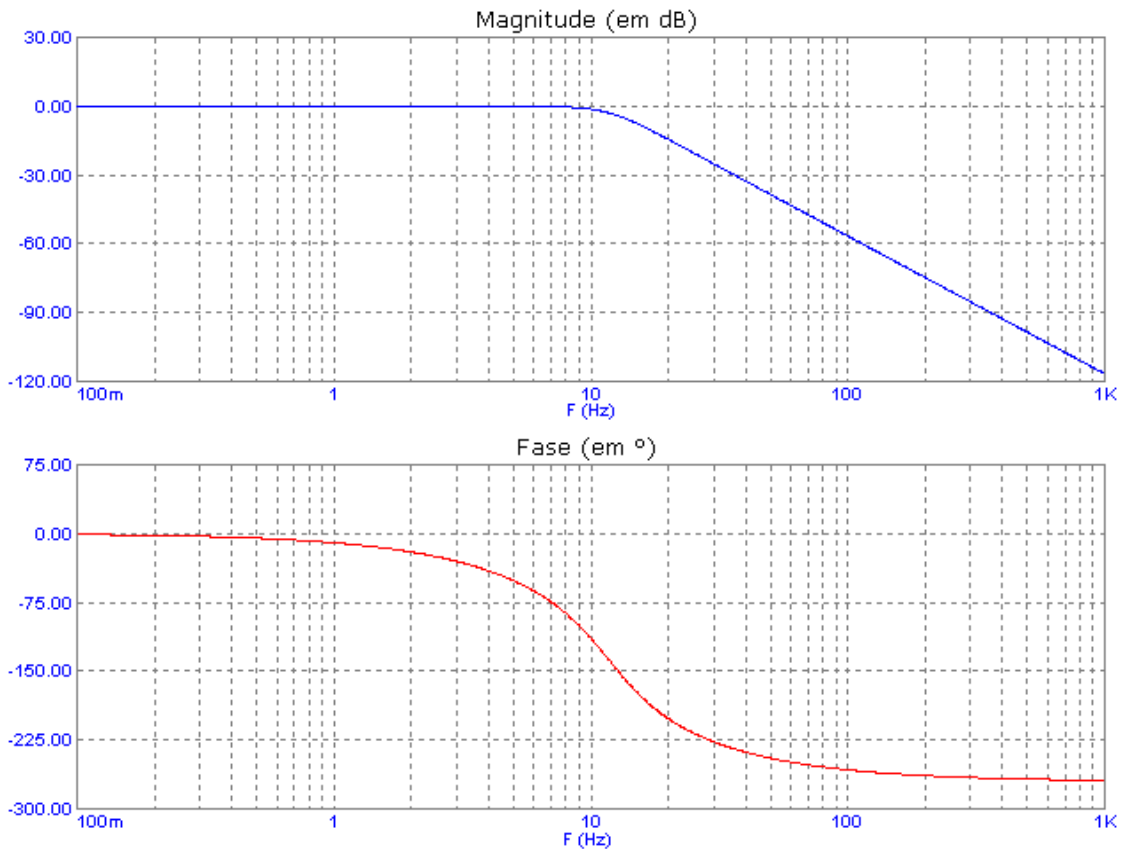


Figura 3.9 – Resposta em frequência do filtro passa-baixas.

Como se pode ver na Figura 3.9, a frequência de corte do filtro passa-baixas é de aproximadamente 10 Hz. As frequências utilizadas nos blocos de excitação estão na ordem de unidades de kHz. A saída do circuito da Figura 3.8 vai para o bloco de processamento de dados.

### 3.4 Bloco de processamento de dados

O bloco de processamento consiste em uma placa Arduino baseada num processador ATmega, programado para realizar a coleta dos dados e a configuração do AD9834.

Para se configurar o AD9834, é necessário escrever em três registradores de sua memória via programação: o registrador de controle, que descreve a forma de onda, entre outras funções; o registrador de fase, que não é modificado pois não há interesse em fazer o controle de fase da corrente; e o registrador de frequência, que permite a configuração da frequência da onda gerada pelo AD9834. A amplitude da onda gerada não é programável. Para mais detalhes, consultar a nota de aplicação AN-1070, da empresa *Analog Devices*.

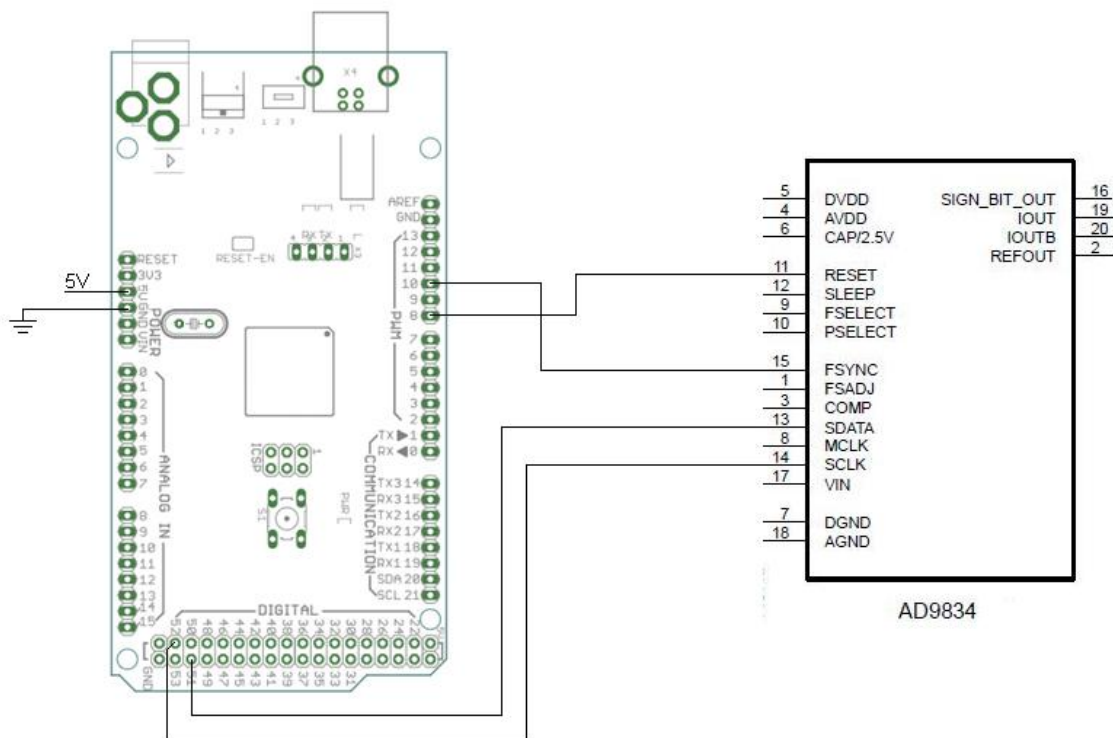


Figura 3.10– Conexões do Arduino para realizar a comunicação.

Para realizar a aquisição dos dados pelo processador ATmega, a saída do circuito de medição é conectada ao conversor analógico-digital A0 do processador, como mostrado na Figura 3.11.



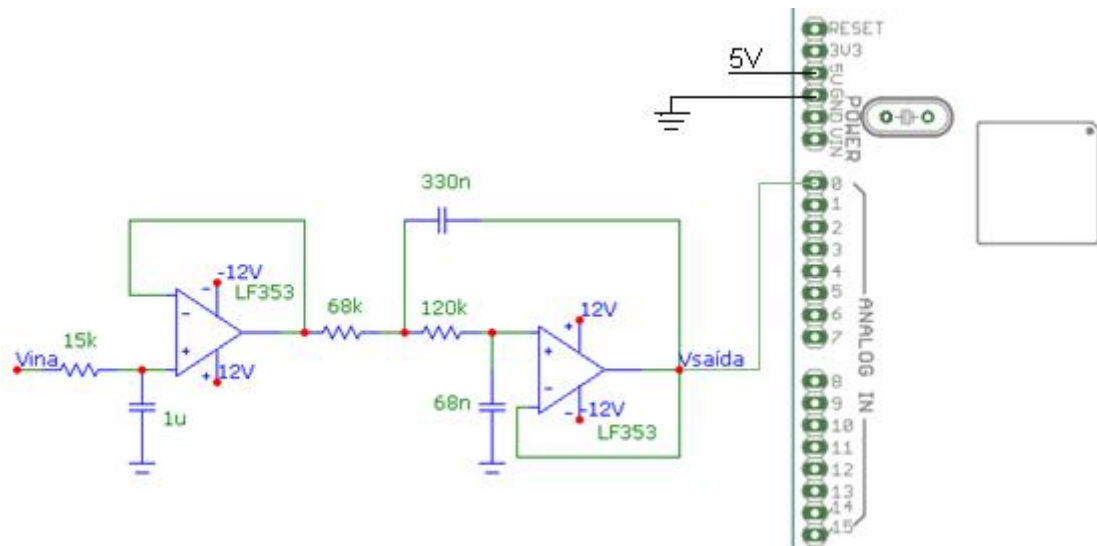


Figura 3.11 – Conexão do circuito de medição ao Arduino.

As portas AD do Arduino convertem um valor analógico de tensão, de 0V a 5V, em uma variável de dez bits. Durante a inspeção, o valor recebido pela porta analógica será enviado para um computador em tempo real, via interface serial. Como a interface serial é capaz de enviar apenas oito bits por ciclo, o valor adquirido de dez bits pela porta AD deve ser convertido em uma variável de oito bits antes de ser enviado. Por limitações de capacidade de processamento devido à baixa frequência do *clock* do Arduino, o tempo mínimo de amostragem conseguido é de 30 milissegundos. Após a aquisição de mil amostras, o Arduino desliga.

Resumindo, o processador é programado para realizar a configuração do AD9834 via SPI. Feito isso, ele entra num ciclo em que é realizada conversão analógico-digital do valor adquirido pelo INA125, e o valor amostrado é enviado via interface serial para o computador. O ciclo termina depois da amostragem de mil valores, sendo que cada valor é relacionado com o valor do campo magnético resultante no momento da amostragem. O fluxograma do programa utilizado é apresentado na Figura 3.12.

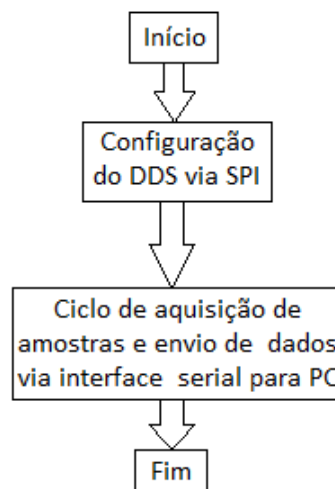


Figura 3.12 – Fluxograma do programa executado pelo Arduino.

### 3.5 Inspeção

Para a validação do protótipo, uma peça longa metálica de aço 1020 foi cortada em tiras. As tiras foram unidas em paralelo sem deixar espaço entre as laterais, formando uma placa metálica. As descontinuidades formadas na placa, que antes eram as laterais da tira, simularão falhas que devem ser detectadas pelo protótipo. Além destas descontinuidades, foram realizados pequenos cortes superficiais perpendiculares às tiras. Na tentativa de manter constante distância entre a sonda e o material no momento da inspeção, as tiras foram anexadas contra uma superfície de plástico. Durante o ensaio, a sonda será pressionada contra a superfície lisa de plástico e movimentada ao longo do plano inspecionado.

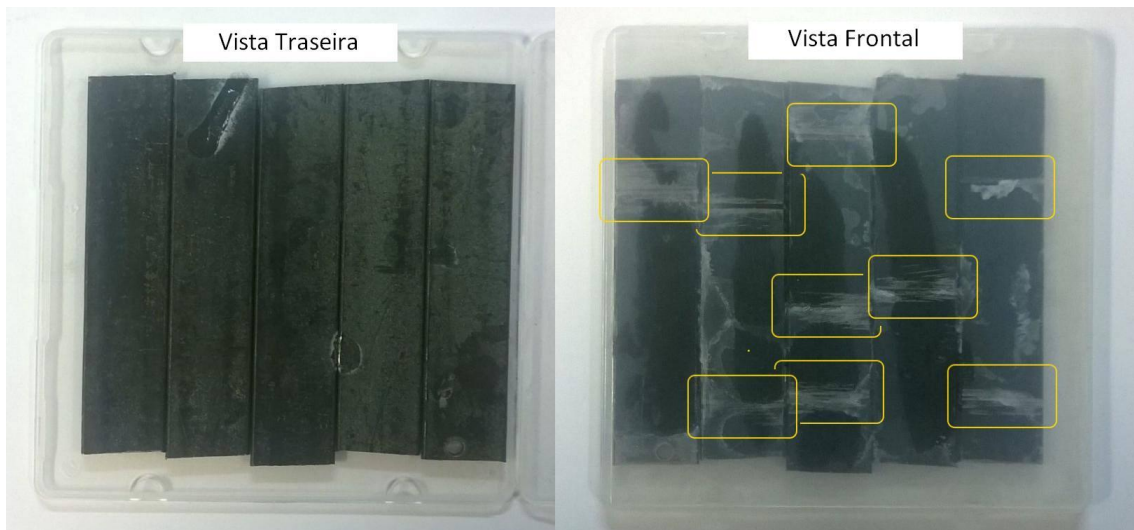


Figura 3.13 – Placa metálica a ser inspecionada. Cortes superficiais estão circulos em amarelo.

Como cortes de diferentes tamanhos foram feitos no corpo de prova, o interessante seria realizar uma varredura em frequência, excitando a bobina com correntes senoidais, para o caso de alimentação via fonte de Howland, de 500Hz a 10kHz, que é uma boa faixa de frequências para detecção de falhas em aço de até 1mm (J. Hansen, 2004).

O primeiro levantamento de dados foi feito sem a utilização do Arduino como plataforma de aquisição de dados, sendo que a aquisição destes foi feita através de osciloscópio. Entretanto, neste levantamento não há uma relação linear entre posição e o tempo em que os dados foram adquiridos. Para este levantamento, a sonda foi arrastada manualmente ao longo das linhas que atravessam o corpo de prova, mostradas na Figura 3.14. A inspeção nas linhas 1, 2, 3 e 4 deve detectar as descontinuidades entre as tiras metálicas. A inspeção nas linhas 5, 6, 7, 8 e 9 deve detectar os cortes superficiais feitos nas tiras.

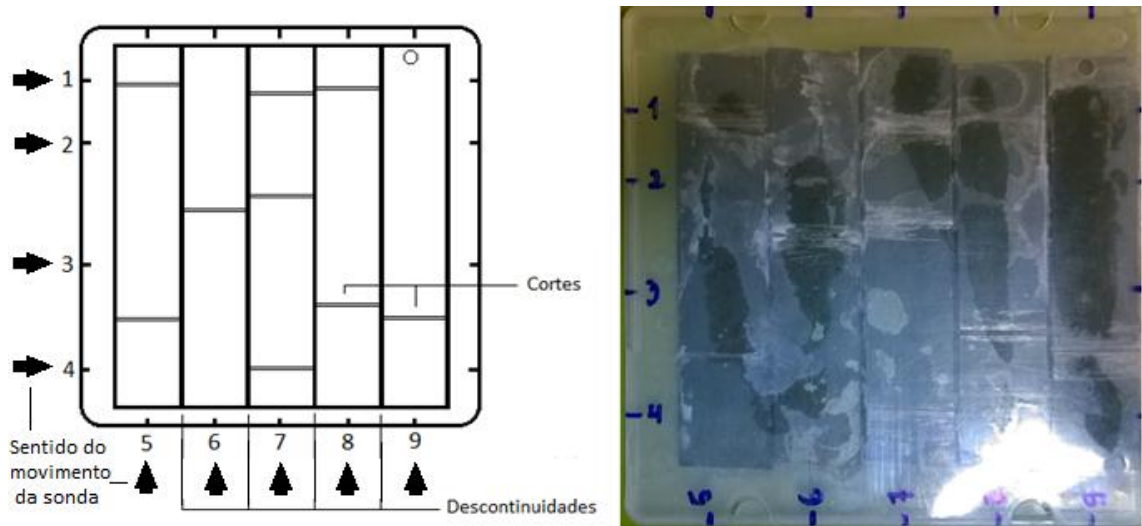


Figura 3.14 – Linhas em que foram feitas inspeções à mão.

A realização da inspeção também será feita anexando a sonda ao efetuador de um robô da empresa Stäubli, situado no Laboratório de Automação e Robótica da UFRGS, e programando o robô para que ele movimente a sonda ao longo do material, em direção perpendicular às falhas a serem detectadas. A velocidade de inspeção é programada para que mil amostras sejam feitas em uma linha que cruza a placa da esquerda para a direita. Quando as mil amostras são coletadas, o Arduino é reiniciado, e mais mil amostras são coletadas em uma nova linha paralela à anterior. Esse processo é repetido até que todo o material seja percorrido pela sonda. Assim, teremos uma matriz de valores que descrevem o perfil da peça inspecionada. A partir desta matriz, é possível gerar em MATLAB uma imagem em escala de cinza para visualizar as falhas na peça.



Figura 3.15 – Robô da empresa Stäubli.

## 4 Resultados

Como explicado anteriormente, o AD9834 é responsável por gerar a onda que controla as fontes de corrente. A abordagem inicial é aplicar excitações senoidais de 500Hz a 10kHz, em intervalos de 500Hz. Entretanto, o AD9834 não responde com tensões constantes para esta faixa de frequências, como mostrado na Figura 4.1.

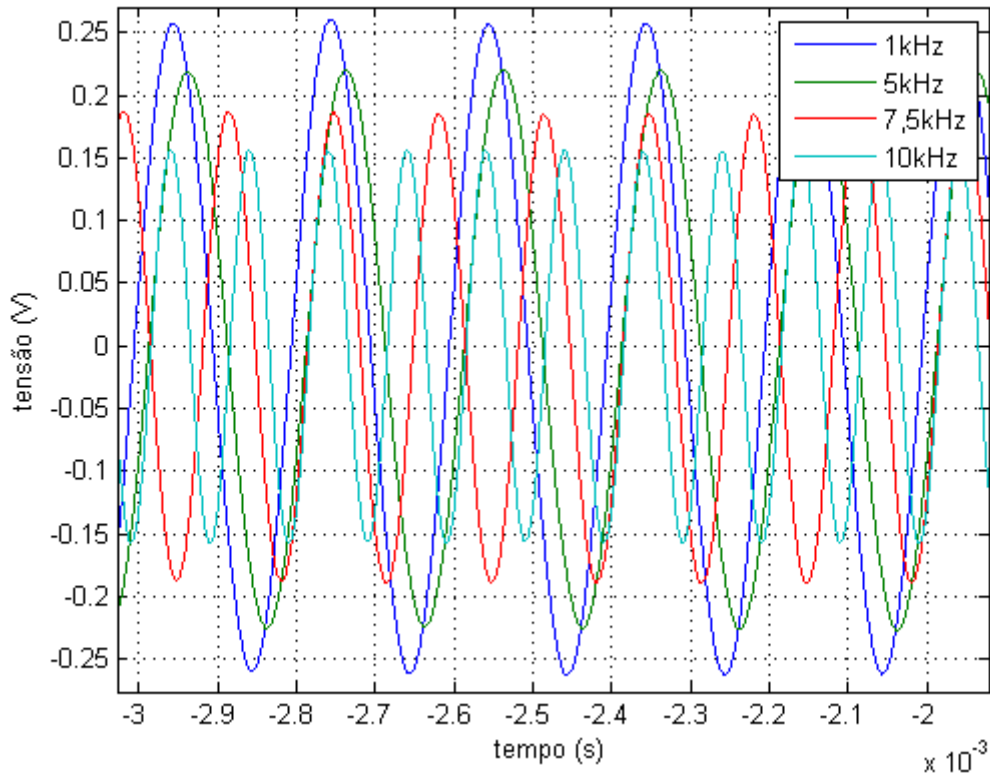


Figura 4.1 – Sinal  $V_{dds}$  para diversas frequências.

Uma maneira de contornar este problema seria modificar manualmente o ganho do potenciômetro que controla o ganho da tensão de entrada da fonte de Howland (Figura 3.4) para que a corrente tenha o mesmo valor para todas as frequências. Entretanto, este método tornaria o ensaio muito trabalhoso e tornaria a inspeção muito lenta.

A Figura 4.2 apresenta a tensão de saída do GMR para excitações senoidais nas frequências de 1 kHz, 5 kHz e 10 kHz ao passar por uma mesma descontinuidade do corpo de prova. Quando o sensor detecta uma falha, ele responde com uma oscilação, com crista e vale bem definidos. Como se pode observar na Figura 4.2, o sensor GMR respondeu com uma tensão pico-a-pico maior para a frequência de 1 kHz. Portanto, para as inspeções será utilizada frequência fixa de 1 kHz.

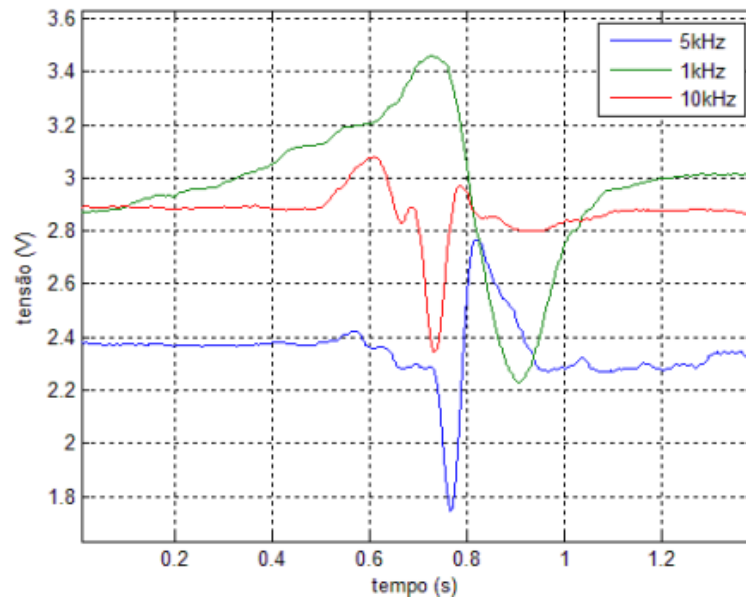


Figura 4.2 – Resposta do sensor GMR.

Como a tensão no resistor de  $10\ \Omega$  que está em série com a bobina de excitação (Figura 3.2) é de  $1,2\ \text{V}$ , pela lei de Ohm a corrente na bobina tem uma amplitude de  $120\ \text{mA}$ . Não foi possível a aplicação da corrente de  $160\ \text{mA}$ , calculada pela Equação (3.2), pois, a partir do valor de  $120\ \text{mA}$ , a tensão na carga satura, distorcendo a forma de onda da corrente.

#### 4.1 Resultados de inspeção

Como dito anteriormente, dois tipos de inspeção foram realizadas. A inspeção feita sem o robô foi realizada passando a sonda manualmente através das nove linhas desenhadas sobre o corpo de prova, como é mostrado na Figura 3.14. A Figura 4.4 mostra o resultado da inspeção sobre as linhas 1 a 4. A Figura 4.5 mostra o resultado da inspeção sobre as linhas 5 a 9.

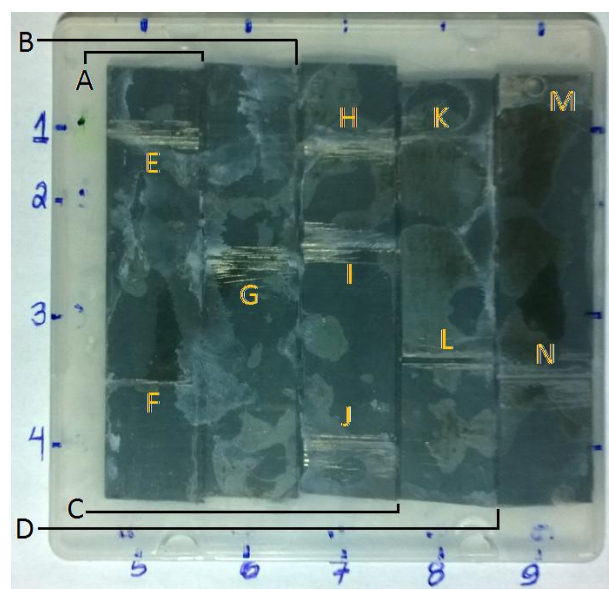


Figura 4.3 – Falhas a serem detectadas no corpo de prova.

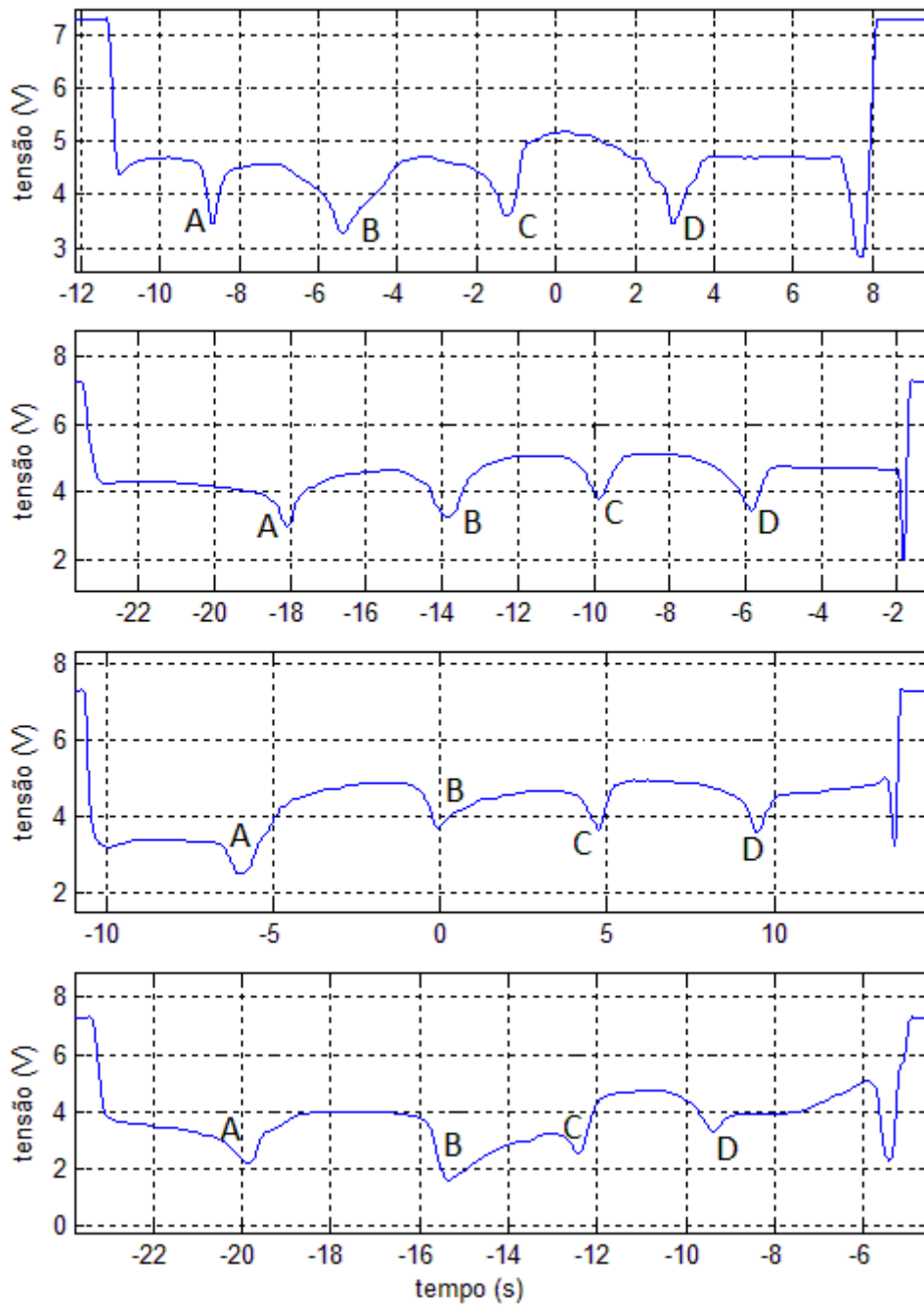


Figura 4.4 – Resposta do sensor GMR para as linhas 1, 2, 3 e 4, nesta ordem.

As letras mostradas nos gráficos das figuras 4.4 e 4.5 relacionam a resposta do sensor GMR com a sua respectiva falha. As falhas estão destacadas na Figura 4.3.

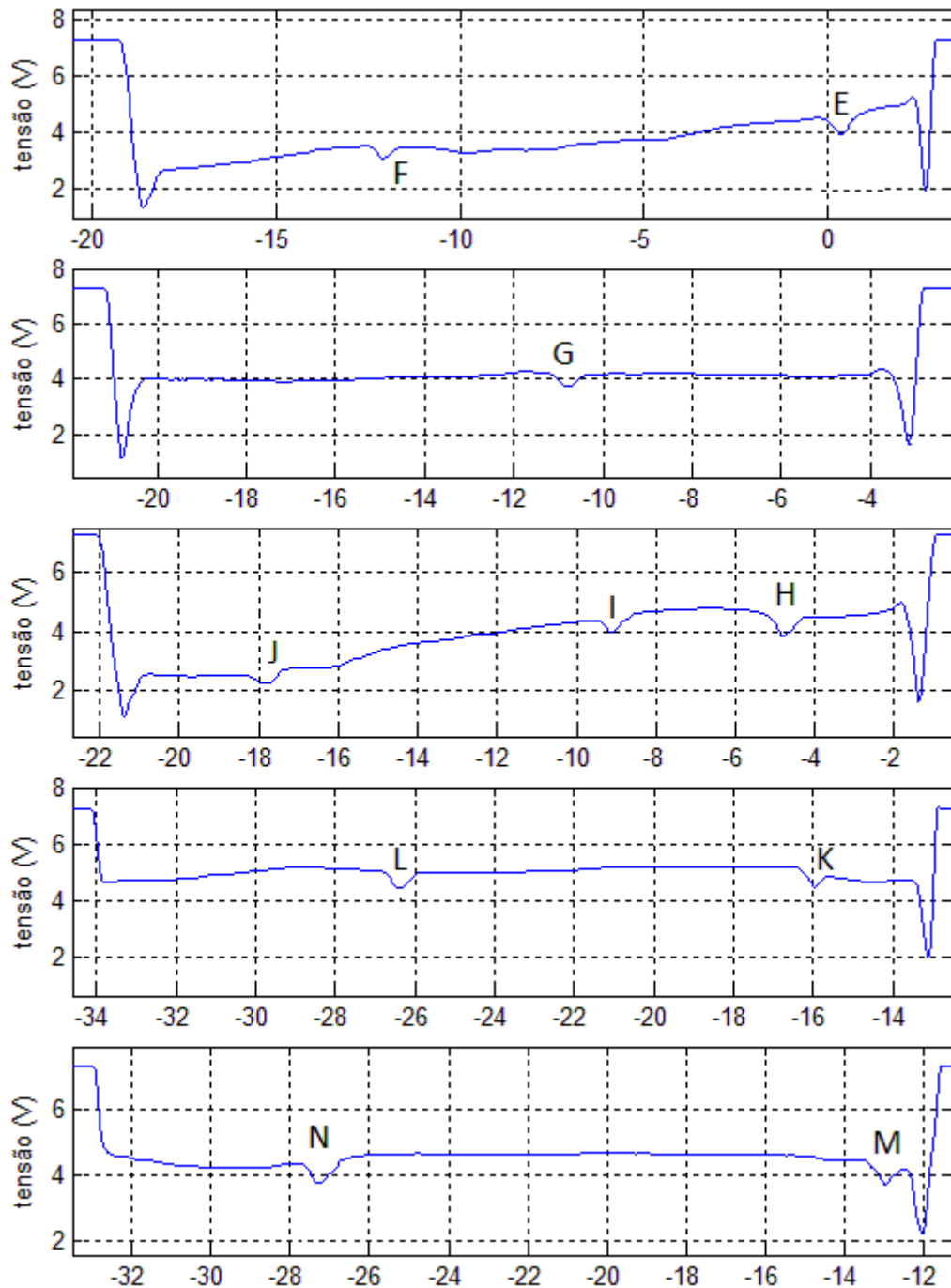


Figura 4.5 – Resposta do sensor GMR para as linhas 5, 6, 7, 8 e 9, nesta ordem.

Como o ensaio é feito à mão, manipulando a sonda na direção da linha inspecionada, não há como garantir velocidade constante. Portanto, não há uma relação linear entre tempo e posição da sonda. As quatro linhas inspecionadas pela sonda cruzam por quatro discontinuidades, que podem ser identificadas pelos vales formados na resposta do sensor GMR, destacados na Figura 4.4. Os trechos iniciais e finais de cada gráfico, onde a tensão é de aproximadamente 7,5V, a sonda não está cobrindo a região da placa. Como se pode notar, o valor da tensão de resposta do GMR onde a sonda está sobre uma região livre de falha não é o mesmo em todos os trechos. Ainda que as tiras metálicas tenham sido coladas contra uma superfície lisa de plástico

com o intuito de se preservar a altura relativa entre sonda e material, é possível que em alguma região a colagem não tenha sido feita com precisão, fazendo com que a orientação da sonda e altura relativa entre sonda e material variem. Esta possível variação da altura relativa pode ser a causa da diferença entre a tensão de resposta do sensor para diferentes trechos sem falhas. As inspeções sobre as linhas 1 e 4 passam paralelamente por cortes superficiais. Entretanto, não há como concluir se a presença destes cortes influenciou na resposta do GMR desta análise.

Na Figura 4.5, é possível ver claramente que as oscilações destacadas estão associadas aos cortes presentes no material, devido à presença destes e à posição em que eles se encontram no sinal de resposta. Na resposta do sensor na linha 9, há uma oscilação bem no final do trajeto, provavelmente relacionada à falha circular contida no material. Comparando a Figura 4.4 e a Figura 4.5, notamos que a amplitude da oscilação devido às descontinuidades é maior do que a amplitude da oscilação proveniente dos cortes. Esta diferença deve-se ao fato de que as descontinuidades são falhas de maior profundidade que os cortes.

Para a realização do ensaio de varredura do corpo de prova utilizando o robô Stäubli, a sonda foi anexada ao efetuador do robô.

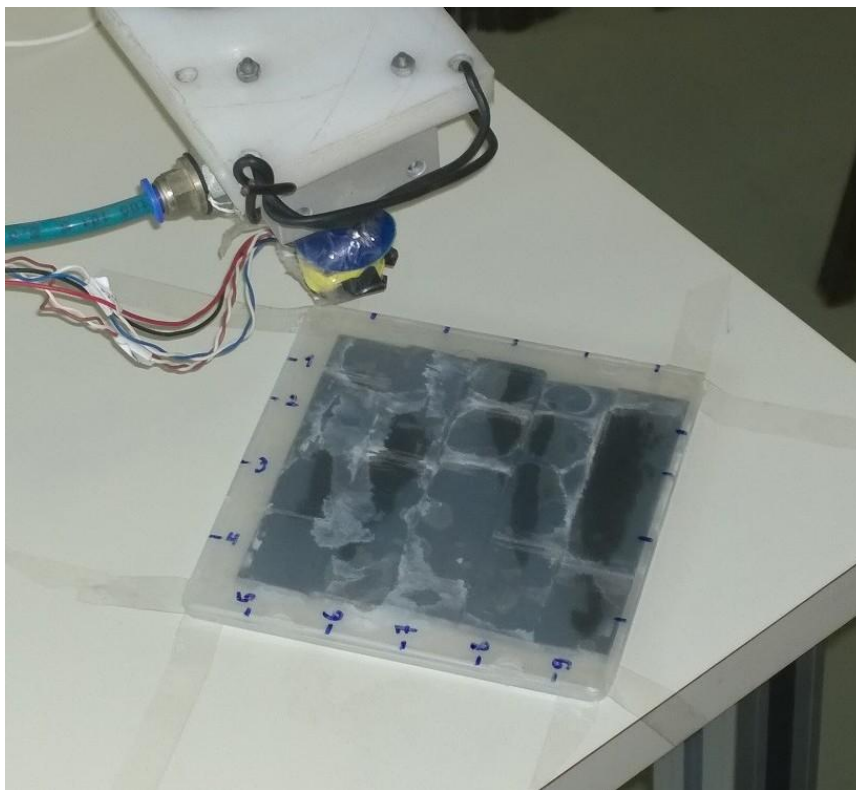


Figura 4.6 – Inspeção sendo feita pelo robô Stäubli.

Para gerar o mapeamento da peça, a ideia inicial era inspecionar a placa em, no mínimo, com linhas perpendiculares às descontinuidades da placa, espaçadas por 1 mm. Devido a complicações de planejamento, apenas um trecho muito pequeno da peça foi mapeado, não sendo possível gerar a imagem. Portanto, um ensaio foi feito



utilizando o robô para inspecionar as linhas 5 à 9. O resultado dessa inspeção está na Figura 4.7.

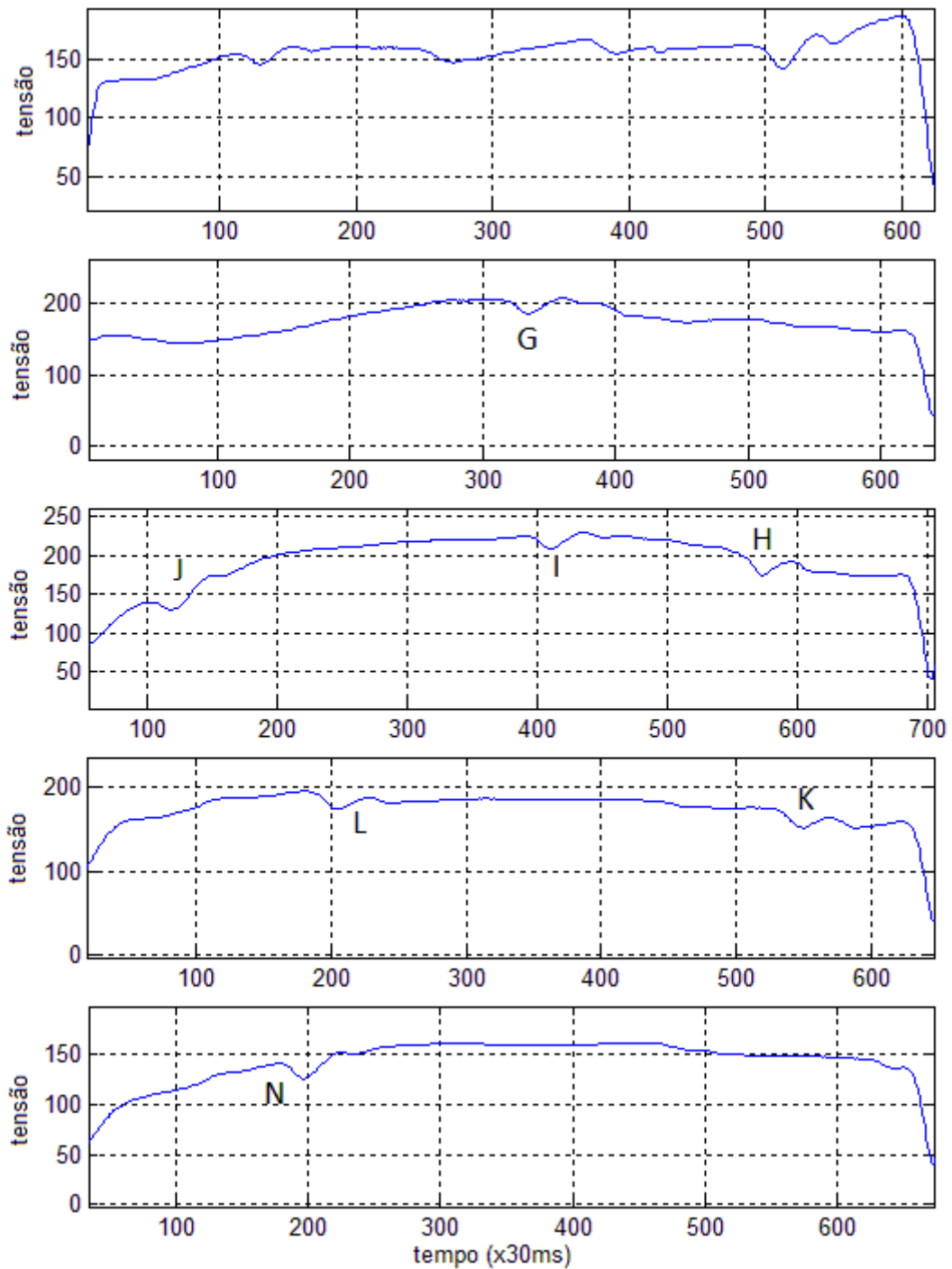


Figura 4.7– Inspeção das linhas 5, 6, 7, 8 e 9, respectivamente, utilizando o robô Stäubli.

Como as variáveis adquiridas via interface serial são de 8 bits, os valores do gráfico variam entre 0 e 255. O valor de referência do conversor analógico-digital do Arduino é de 5V. O resultado gerado nesta inspeção foi impreciso, se comparado o resultado gerado pela inspeção feita à mão. No gráfico correspondente à inspeção feita na linha 5, nota-se uma região entre as amostras 200 e 400 onde a resposta do GMR oscila,

gerando incerteza sobre o número de falhas detectadas. No gráfico correspondente à inspeção da linha 9, a falha representada pela letra M não é detectada. Entretanto, não se pode concluir que utilizar o robô Stäubli é um método ruim para movimentar a sonda e realizar ensaios, pois a sonda não estava rigidamente anexada ao efetuator do robô, podendo sofrer alterações em sua orientação enquanto passa pela superfície do corpo de prova.

## 5 Conclusão

O trabalho relatado neste texto descreve um projeto eletrônico visando a excitação de uma bobina e a medição do campo magnético proveniente de correntes parasitas, objetivando a detecção de falhas em materiais condutores. O protótipo conta com uma sonda que emite e mede campos magnéticos provenientes de correntes parasitas, com circuitos que produzem excitações e com um amplificador de instrumentação.

A partir da metodologia proposta, foi possível, a partir de excitação senoidal de 1kHz com uma fonte de Howland, detectar cortes e descontinuidades no corpo de prova testado, com boa repetitividade. A inspeção realizada manualmente detectou todas as falhas que haviam no material testado. A sonda respondeu como esperado ao passar por falhas no corpo de prova. Devido a uma dificuldade gerada pela dinâmica do componente AD9834, não foi possível levantar respostas da sonda GMR para uma faixa de frequências de maneira que a inspeção fosse ágil e confiável.

Com a inspeção feita à mão, foi possível observar a resposta padrão do sensor GMR onde há falhas. Entretanto, a dificuldade de manter velocidade constante faz com que não seja possível a mensurar com precisão a posição da falha. Para adquirir resultados mais confiáveis sem a necessidade de utilizar um robô ou qualquer tipo de máquina, como CNC, de difícil acesso, é preciso projetar um sistema mais simples que garanta posição e velocidade da sonda confiáveis.

### Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, seria interessante realizar o mapeamento do corpo de prova. A concepção de um circuito de excitação senoidal cuja resposta em frequência seja constante até 10kHz, realizar ensaios em diversas frequências, e comparar com os resultados deste trabalho. Projetar um circuito com excitação de onda quadrada para a aplicação da técnica PEC também seria interessante. Também é possível realizar o mesmo trabalho aqui descrito sem a utilização do sensor GMR, mas medindo a variação da amplitude e da fase da tensão na bobina de excitação para a detecção das falhas.

Além destes, outros trabalhos podem ser realizados visando a concepção de um mecanismo que garanta posição e velocidade confiáveis para conseguir maior qualidade de inspeção sem a necessidade de fazer uso de máquinas mais sofisticadas, como um robô Stäubli.

## 6 Referências

- BLITZ, Jack. ***Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing***. Chapman & Hall, Londres. 1997.
- BLITZ, Jack; Geoff Simpson. ***Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing***. Chapman & Hall, Londres. 1996.
- W. Tobin. ***The Life and Science of Léon Foucault***, Cambridge University Press. 2003.
- HALLIDAY; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física, Volume 3**. LTC, Oitava Edição. 2008.
- HANSEN, J. ***The eddy current inspection method***, 2004
- DOGARU, T. e SMITH, S. T.. ***Giant Magnetoresistance-Based Eddy-Current Sensor***, 2001.
- SMETANA, M. et al.. ***Pulsed Excitation in Eddy Current Non-Destructive Testing of Conductive Materials***, 2008.
- BETTA, G et al.. ***GMR based ECT instrument for detection and characterization of a crack on a planar specimen: a hand-held solution***, 2012.
- PORTO, R. W. et al. ***Design and Analysis of a GMR Eddy Current probe for NDT***, 2013.
- ***GMR Sensors data book***, Non Volatile Electron. Corp., Eden Prairie, MN, Apr. 2003.
- PORTO, R. W., ***Projeto e Avaliação de um Canal de Medição de Bioimpedâncias***, 2009.

## 7 Anexos

### 7.1 Bobina de excitação

A bobina utilizada neste trabalho possui um número de espiras  $N = 600$ , comprimento  $l = 11\text{m}$  e um raio médio  $a = 9,4\text{mm}$ .

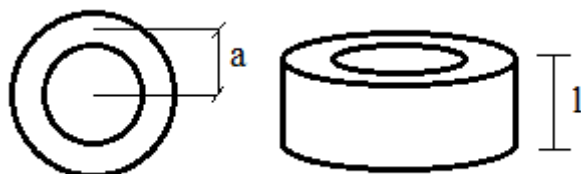


Figura 7.1 – Detalhes construtivos da bobina de excitação.

### 7.2 Filtro passa-baixas

O filtro utilizado neste trabalho é um filtro Sallen-Key de terceira ordem de 10Hz de frequência de corte. Para gerar um filtro Sallen-Key de terceira ordem, é necessário unir dois filtros, um de primeira ordem e outro de segundo. Um filtro de primeira ordem é um filtro RC simples.

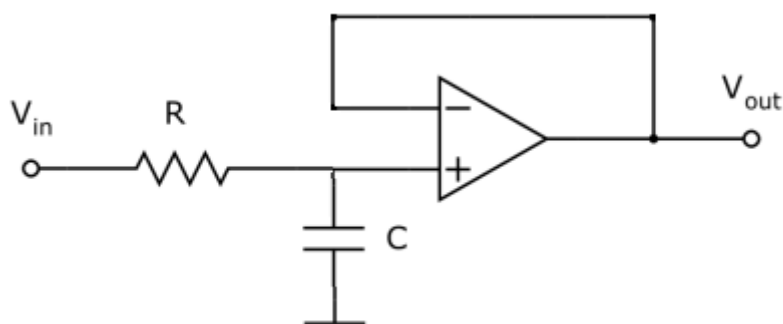


Figura 7.2 – Filtro RC.

A frequência de corte desejada é de 10Hz, portanto:

$$f_c = 10\text{Hz} = \frac{1}{2\pi RC'}$$

sendo  $f_c$  a frequência de corte do filtro. Utilizando os valores comerciais  $R = 15\text{k}\Omega$  e  $C = 1\mu\text{F}$ , obtemos uma frequência de corte de 10,61Hz. Este filtro deve ser conectado a outro filtro Sallen-Key de segunda ordem para que seja obtido um filtro de terceira ordem. A frequência de corte de um filtro Sallen-Key de segunda ordem é dada por:

$$f_c = 10\text{Hz} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1C_1R_2C_2}}$$

Utilizando os valores comerciais  $R_1 = 68\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 120\text{k}\Omega$ ,  $C_1 = 68\text{nF}$  e  $C_2 = 330\text{nF}$ , obtemos uma frequência de corte de 11,73Hz. O fator de qualidade foi desconsiderado no projeto do filtro.

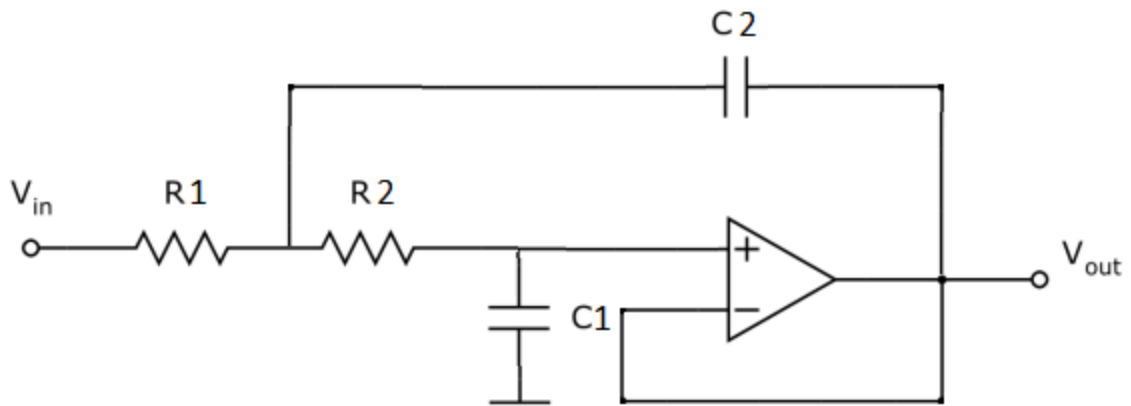


Figura 7.3 – Filtro Sallen-Key de segunda ordem.

### 7.3 Código em C

O código de linguagem em C utilizado para programar a rotina do Arduino é o seguinte.

```
#include "SPI.h"
int ss=10;
int del=200;
int rst=8;
int clk=9;

// 1kHz  1101000110110
// 5kHz  1000001100010010
// 7,5kHz 1100010010011011
// 10kHz  10000011000100100

word control=0b0010000100000000;
word freq1=0b0101101000110110; //Menos significativo
word freq2=0b0100000000000000;
word phase=0b1100000000000000;
word control2=0b0010000000000000;

byte data;
long tempoAtual;

int entrada;
byte tempo;

int i;

void setup(){
  pinMode(clk, OUTPUT);
  pinMode(rst, OUTPUT);
  pinMode(10, OUTPUT);
  SPI.begin();
  SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
```

```

SPI.setDataMode(SPI_MODE2);
SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV2);

Serial.begin(9600);
analogReference(DEFAULT);

}

void loop(){ //Programa principal
delay(1000);

for(i = 0; i < 2;i++){
  digitalWrite(rst, LOW);

  digitalWrite(10,LOW); //Selecciona escravo (DDS)
  data=highByte(control);
  SPI.transfer(data);
  data=lowByte(control);
  SPI.transfer(data);
  //digitalWrite(10,HIGH);
  //delay(20);

  //digitalWrite(10,LOW);
  data=highByte(freq1);
  SPI.transfer(data);
  data=lowByte(freq1);
  SPI.transfer(data);
  //digitalWrite(10,HIGH);
  //delay(20);

  //digitalWrite(10,LOW);
  data=highByte(freq2);
  SPI.transfer(data);
  data=lowByte(freq2);
  SPI.transfer(data);
  //digitalWrite(10,HIGH);
  //delay(20);

  //digitalWrite(10,LOW);
  data=highByte(phase);
  SPI.transfer(data);
  data=lowByte(phase);
  SPI.transfer(data);
  //digitalWrite(10,HIGH);
  //delay(20);

  //digitalWrite(10,LOW);
  data=highByte(control2);
  SPI.transfer(data);
  data=lowByte(control2);
  SPI.transfer(data);
  digitalWrite(10,HIGH);

  delay(2000);
}
//delay(10000);
establishContact();
//delay(10000);
tempoAtual = millis();

```

```

while(1){
  for(i = 0; i < 1000; i++){
    entrada = analogRead(A0)/4;
    tempo = millis() - tempoAtual;
    tempoAtual = millis();
  //  Serial.print("Sensor = ");
  //  Serial.println(entrada);
  //  Serial.print("Tempo = ");
  //  Serial.println(tempo);
  //  Serial.println();
    delay(30);
  }
  while(1);
}
}

void establishContact() {
  for (i = 0; i < 5;i++) {

    Serial.print("COMECAR ENSAIO EM ");
    Serial.print(5-i);
    Serial.print(" SEGUNDOS");
    Serial.println();
    delay(1000);
  }
}
}

```