



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA**

GERÊNCIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL - CPGEI**

RICARDO KERSCHBAUMER

**APLICAÇÃO DE FILTROS CASADOS EM
DETECTORES DE METAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CURITIBA
JULHO DE 2008.**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

apresentada a UTFPR
para obtenção do grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

por

RICARDO KERSCHBAUMER

**APLICAÇÃO DE FILTROS CASADOS EM DETECTORES
DE METAIS**

Banca Examinadora:

Presidente e Orientador:

PROF. DR. VOLNEI PEDRONI

UTFPR

Examinadores:

PROF. DR. ANTONIO HERONALDO DE SOUSA

UDESC

PROF. DR. RICHARD DEMO SOUZA

UTFPR

Curitiba, Julho de 2008

RICARDO KERSCHBAUMER

**APLICAÇÃO DE FILTROS CASADOS EM
DETECTORES DE METAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do grau de “Mestre em Ciências”

Área de Concentração: Informática Industrial.

Orientação:

Prof. Dr. Volnei Pedroni

Curitiba, **Julho de 2008**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UTFPR – Campus Curitiba

K39a Kerschbaumer, Ricardo
Aplicação de filtros casados em detectores de metais / Ricardo Kerschbaumer
Curitiba, UTFPR, 2008
XXI, 79 p. : il. ; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Volnei Pedroni
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2008
Bibliografia: p. 78-79

1. Engenharia elétrica. 2. Processamento de sinais – Técnicas digitais. 3. Filtros elétricos. I. Pedroni, Volnei, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD: 621.3822

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que sempre me guiou, agradeço também a minha esposa e filho, cujo apoio incondicional e compreensão tornaram este trabalho possível. Agradeço ao meu orientador pela paciência e pela ajuda, à UTFPR, em especial ao CPGEI, pela oportunidade. Agradeço ainda aos meus professores e colegas, que tornaram esta experiência ainda mais valiosa. E por fim, agradeço à Automatic pela disponibilidade de tempo e recursos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvii
RESUMO	xix
<i>ABSTRACT</i>	xxi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÕES	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1.1 Detectores de metais	5
2.1.2 Filtros casados	12
2.2 TÓPICOS TEÓRICOS	15
2.2.1 Origem dos filtros casados	15
3 METODOLOGIA	19
3.1 REQUISITOS DO TRABALHO PROPOSTO	19
3.2 TRABALHO DESENVOLVIDO	20
3.3 MATERIAIS E INFRA-ESTRUTURA	20
3.3.1 Computador e softwares	20
3.4 DESENVOLVIMENTO	28
3.4.1 Desenvolvimento do software	28
3.4.2 Desenvolvimento do hardware	34
4 RESULTADOS	51
4.1 RESULTADOS OBTIDOS COM O ALGORITMO DO FILTRO CASADO	51
4.2 RESULTADOS OBTIDOS COM O FILTRO PASSA FAIXA	55
4.3 RESULTADOS OBTIDOS COM O FILTRO PASSA BAIXAS	55
4.4 RESULTADOS OBTIDOS COM O DETECTOR DE FASE	56
4.5 RESULTADOS OBTIDOS COM O AMPLIFICADOR DIFERENCIAL	57
4.5.1 Amplificador diferencial amplificando diferença de amplitude	58
4.5.2 Amplificador diferencial amplificando diferença de fase	58
4.6 RESULTADOS OBTIDOS NO PROTÓTIPO	59

4.6.1	Saída do circuito analógico	60
4.6.2	Algoritmo do filtro casado no DSP.....	61
4.7	RESULTADOS COMPARATIVOS.....	63
4.8	COMPARATIVO DE CUSTOS	64
4.9	FACILIDADE DE OPERAÇÃO E AJUSTE	65
5	DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	67
5.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
5.1.1	Análise dos resultados da simulação do algoritmo	67
5.1.2	Resultados da simulação dos filtros analógicos.....	67
5.1.3	Comportamento do circuito detector de fase	68
5.1.4	Análise do comportamento do amplificador diferencial.....	68
5.1.5	Funcionamento do protótipo	69
5.2	CONCLUSÕES	70
5.2.1	Conclusões gerais.....	71
5.2.2	Conclusão específica.....	71
5.3	TRABALHOS FUTUROS	72
	ANEXO 1	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Detector de metais com bobina envolvente.....	1
Figura 2: Detector de metais com bobina plana.....	2
Figura 3: Posição das bobinas no detector de metais.....	6
Figura 4: Tensão na saída do amplificador.....	7
Figura 5: Fase do sinal detectado.....	7
Figura 6: Conjunto simples de bobinas planas.....	8
Figura 7: Bobina receptora em forma de oito.....	9
Figura 8: Mapa de sensibilidade para duas bobinas.....	9
Figura 9: Mapa de sensibilidade para bobina em forma de oito.....	10
Figura 10: Mapa de sensibilidade no plano x, y.....	10
Figura 11: Etapas da formação de $h(\tau)$	13
Figura 12: Aplicação típica de filtros casados.....	15
Figura 13: Computador usado no projeto.....	21
Figura 14: Fonte de bancada.....	22
Figura 15: Osciloscópio digital.....	23
Figura 16: Diagrama de blocos da placa de demonstração.....	23
Figura 17: Placa de demonstração do DSP.....	24
Figura 18: Esteira transportadora pequena.....	25
Figura 19: Esteira transportadora.....	25
Figura 20: Detector de metais Shadow KS04.....	26
Figura 21: Bobina de detecção usada no detector Shadow.....	26
Figura 22: Potenciômetros de ajuste da sensibilidade.....	27
Figura 23: Potenciômetros de ajuste.....	27
Figura 24: Algoritmo para realizar a convolução.....	29
Figura 25: Código em C para o filtro casado.....	29
Figura 26: Fluxograma do filtro casado.....	30
Figura 27: Fluxograma do programa principal.....	31
Figura 28: Tela de parametrização do PWM.....	32
Figura 29: Tela de parametrização do conversor analógico digital.....	33
Figura 30: Tela de parametrização do temporizador.....	34
Figura 31: Impressora usada para confeccionar a placa.....	35
Figura 32: Impressora desenhando as trilhas na placa.....	35

Figura 33: Detalhe do desenho da placa.	36
Figura 34: Diagrama de blocos do circuito.	37
Figura 35: Fonte de alimentação do circuito.	37
Figura 36: Oscilador controlado.	38
Figura 37: Circuito do DSP.	39
Figura 38: Filtros e amplificadores.	40
Figura 39: Detalhe do circuito do filtro passa-faixa.	40
Figura 40: Nomenclatura dos componentes no filtro.	41
Figura 41: Resposta em frequência do filtro passa faixa.	42
Figura 42: Fase do filtro passa faixa.	42
Figura 43: Pólos e zeros.	43
Figura 44: Amplificador diferencial.	43
Figura 45: Circuito detector de fase.	44
Figura 46: Filtro passa baixas.	44
Figura 47: Nomenclatura dos componentes nesta topologia.	45
Figura 48: Resposta em frequência do filtro passa baixas.	46
Figura 49: Fase do filtro passa baixas.	46
Figura 50: Pólos e zeros.	47
Figura 51: Amplificador e limitador.	47
Figura 52: Conjunto de bobinas construído em circuito impresso.	49
Figura 53: Sinal característico de um detector de metais.	51
Figura 54: Forma de onda aproximada por retas.	52
Figura 55: Primeiro sinal ruidoso e a sua saída no filtro.	52
Figura 56: Segundo sinal ruidoso e a sua saída no filtro.	53
Figura 57: Terceiro sinal ruidoso e a sua saída no filtro.	54
Figura 58: Saída do filtro passa baixas.	54
Figura 59: Simulação do filtro passa faixa.	55
Figura 60: Resultado da simulação do filtro passa baixas.	56
Figura 61: Sinais usados na simulação do detector de fase.	56
Figura 62: Formas de onda na saída do detector de fase.	57
Figura 63: Sinais na entrada e na saída do amplificador diferencial.	58
Figura 64: Formas de onda do detector de fase com sinal defasado.	59
Figura 65: Protótipo do detector de metais.	60
Figura 66: Captura de tela do osciloscópio.	60

Figura 67: Sinal no vetor de entrada.	61
Figura 68: Padrão a ser detectado pelo filtro.	62
Figura 69: Sinal na saída do filtro casado.	62
Figura 70: Formas de onda no DSP para uma amostra de 19 mm.	63
Figura 71: Resultado dos testes comparativos.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo de custos.....	65
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	- <i>Analog to Digital Converter</i> (Conversor Analógico Digital)
DSP	- <i>Digital Signal Processor</i> (Processador digital de sinais)
FIR	- <i>Finite Impulse Response</i> (Resposta ao impulso limitada)
HP	-Hewlett Packard
JTAG	- <i>Joint Test Action Group</i>
LCD	- <i>Liquid Crystal Display</i> (Monitor de cristal líquido)
LED	- <i>Light Emitting Diode</i> (Diodo emissor de luz)
PWM	- <i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por largura de pulso)
RAM	- <i>Random Access Memory</i> (Memória de acesso aleatório)
SCI	- <i>Serial Communication Interface</i> (Interface de comunicação serial)
SPI	- <i>Serial Peripheral Interface</i> (Interface serial periférica)
GPS	- <i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma nova forma de tratar digitalmente os sinais nos detectores de metais, a fim de melhorar sua sensibilidade e estabilidade, sem contudo, aumentar seu custo. A técnica proposta é a aplicação de filtros casados no tratamento dos sinais oriundos das bobinas detectoras, uma vez que estes sinais sofrem grande interferência de ruídos do ambiente. Os filtros casados são aplicados de forma a maximizar a relação sinal/ruído, melhorando assim o desempenho destes equipamentos. Para comprovar a eficiência desta técnica, foi construído um protótipo de detector de metais e seu desempenho foi comparado com outros equipamentos no mercado. Os resultados mostraram que esta técnica é eficaz, realmente aumenta a sensibilidade e estabilidade destes equipamentos. Outro resultado importante é que empregando filtros casados é possível construir detectores de metais mais baratos e com a mesma qualidade.

ABSTRACT

TITLE: APPLICATION OF MATCHED FILTERS IN METAL DETECTORS

This work presents a new method for digitally processing signals generated by metal detectors, with the purpose of improving their sensitivity and stability, but under the premise of not increasing their cost.

The proposed technique consists in using matched filters to process the signals originated by the detection coils existent in metal detectors, with the purpose of maximizing their signal-to-noise ratio, thus greatly reducing the strong noise interference that is typical in the industrial environments where metal detectors are usually employed.

To demonstrate the efficiency of this technique, a prototype metal detector was constructed and evaluated, with its performance and cost compared against other equipments of this type existent in the market. The results showed the superior performance of the prototype, and also that the estimated cost to build it is even lower than that of current competing products.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÕES

Em vários segmentos da indústria, a automação dos processos é fundamental para manter a produtividade e a competitividade. Muitos destes processos utilizam-se de detectores de metais para os mais variados fins. Estes detectores de metais são normalmente aplicados em esteiras transportadoras. Os detectores de metais usados atualmente nas indústrias dividem-se em dois tipos: de bobinas envoltentes e de bobinas planas.

O primeiro, possui como sensores bobinas que circundam as esteiras por onde o produto passa (YAMAZAKI, NAKANE e TANAKA, 2002). Este modelo possui uma sensibilidade muito grande e é utilizado principalmente na indústria alimentícia. Seus maiores problemas são a fragilidade, a dificuldade de instalação e o elevado custo. A figura 1 apresenta um modelo deste tipo de equipamento.

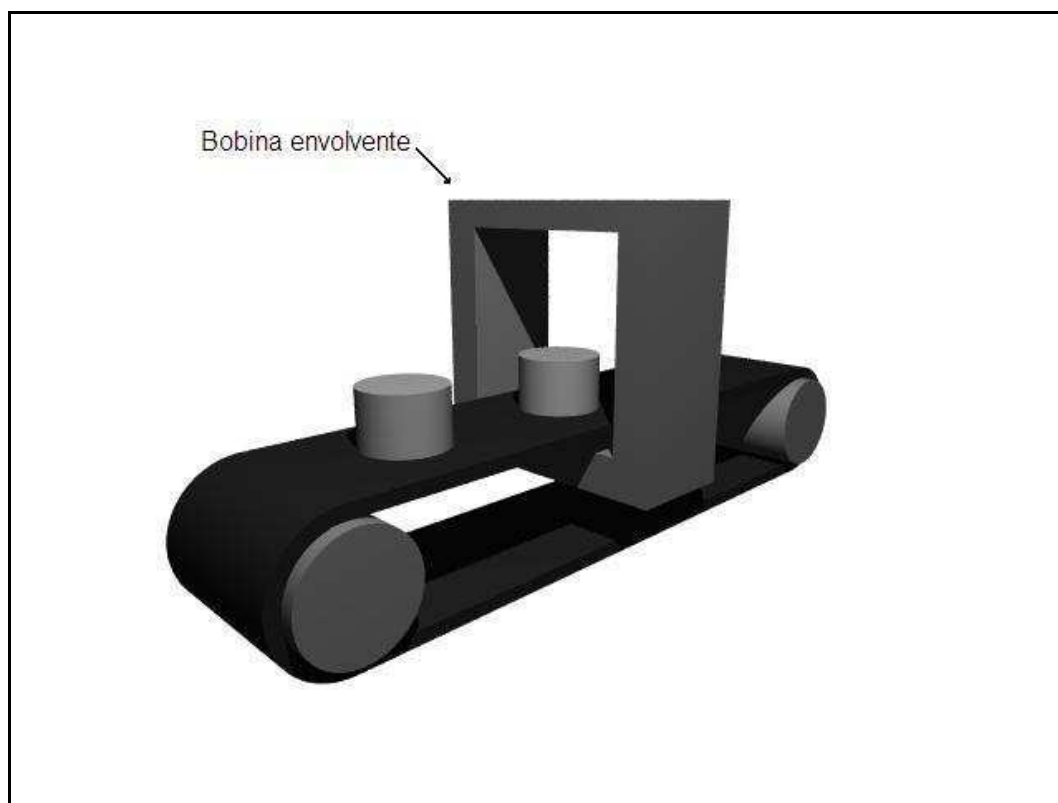


Figura 1: Detector de metais com bobina envoltente.

O segundo modelo utiliza como sensor uma bobina plana (SILVESTER 1996), que fica localizada na parte inferior da esteira, evitando assim choques com o produto, tornando o detector mais robusto e mais barato. O problema deste modelo é que devido à topologia do sensor, sua sensibilidade é reduzida. Este modelo é usado principalmente na indústria madeireira, na fabricação de ração animal e na indústria de papel. A figura 2 apresenta um modelo deste tipo de equipamento.

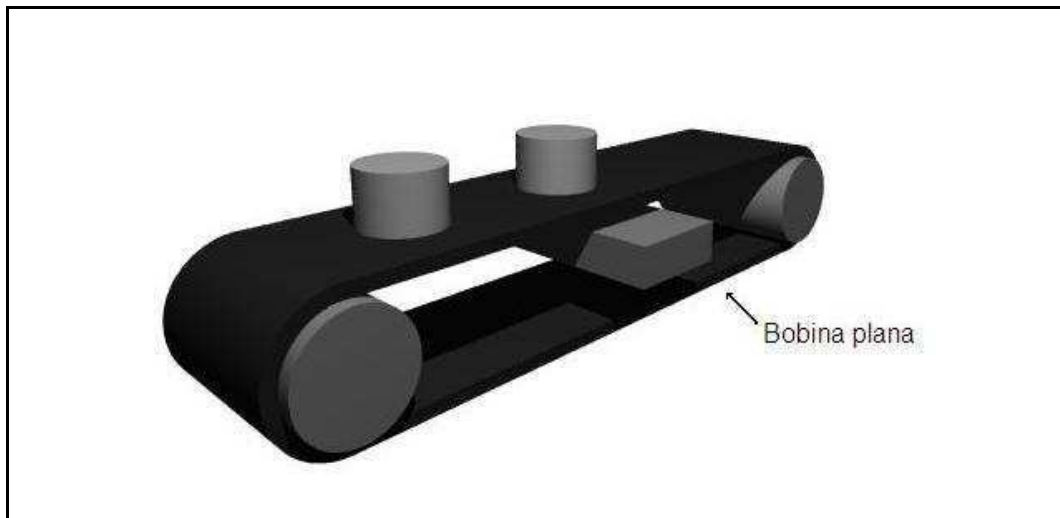


Figura 2: Detector de metais com bobina plana.

A motivação deste trabalho foi fornecer uma alternativa robusta aos detectores de metais encontrados atualmente no mercado, aumentando sua confiabilidade e reduzindo seus custos. Para isso foi empregada uma técnica de processamento de sinais chamada filtros casados. Os detectores de metais atuais utilizam dois tipos de circuitos para tratar os sinais, os mais baratos utilizam complexos circuitos analógicos, que são instáveis e de difícil ajuste e os mais elaborados utilizam poderosos processadores digitais de sinais o que os torna muito caros. Utilizando-se esta técnica é possível construir um circuito mais simples e eficiente que utilize bobinas planas, simplificando assim a instalação e reduzindo os custos, sem comprometer a sensibilidade e a estabilidade do equipamento.

Esta idéia surgiu da demanda por detectores de metais principalmente nas empresas madeireiras, de papel, pedreiras e fábricas de ração animal, onde a confiabilidade e sensibilidade destes equipamentos são fundamentais para a segurança do processo; Contudo, os detectores atuais que atendem estes requisitos usam bobinas envoltivas, que por sua construção física, são muito suscetíveis a acidentes. Por exemplo, em uma pedreira não se pode assegurar que todo o material que passa pela esteira transportadora tenha um tamanho

uniforme, assim qualquer pedra um pouco maior pode destruir as bobinas do detector. Outro problema é a dificuldade de instalação, pois dependendo da estrutura da esteira é muito difícil adaptá-la para que passe no interior das bobinas. Já os detectores com bobinas planas são de baixo custo e fácil instalação, mas tem sensibilidade e alcance limitados, o que dificulta sua utilização. Assim, utilizou-se filtros casados para desenvolver um detector que trabalhe com bobinas planas e tenha a sensibilidade e confiabilidade exigida pelas indústrias. Estes equipamentos são importantes, pois é comum que partículas metálicas indesejadas entrem no processo produtivo. Estas partículas podem vir junto com a matéria prima, ou podem ser partes que se soltam das próprias máquinas que compõem o processo.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo principal aplicar filtros casados nos sinais oriundos de detectores de metal para maximizar a relação sinal/ruído, possibilitando assim um aumento da sensibilidade e da estabilidade deste equipamento.

Para atingir o objetivo principal foram traçados vários objetivos específicos, que são citados a seguir.

- Investigar o funcionamento dos detectores de metais.
- Desenvolver um sensor composto por bobinas planas eficiente e robusto.
- Aprofundar o conhecimento sobre filtros casados e suas aplicações.
- Desenvolver um algoritmo de filtros casados que possa ser aplicado em um DSP (*Digital Signal Processor*) de baixo custo.
- Desenvolver um protótipo de detector de metais que utilize a técnica proposta.
- Testar o protótipo nas mais variadas condições de operação para verificar sua eficiência e estabilidade.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo contém a introdução, nele são discutidas as motivações que levaram a escolha do tema e os objetivos a serem alcançados no decorrer dos trabalhos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica, nele é feita toda a revisão da literatura, são discutidos principalmente os princípios dos filtros casados e dos detectores de metais.

O capítulo três envolve toda a metodologia utilizada, neste capítulo são discutidos os requisitos necessários à elaboração do trabalho, os materiais utilizados e o desenvolvimento geral.

Os resultados obtidos são discutidos no capítulo quatro. Neste capítulo, são analisados os resultados das simulações dos vários componentes do circuito analógico e os resultados obtidos com os testes do protótipo. Também são analisados os resultados das comparações do protótipo com outro detector comercial.

Finalmente no capítulo cinco estão as discussões dos resultados e as conclusões. Este capítulo apresenta os vários aspectos relacionados com os resultados encontrados no capítulo anterior, bem como as conclusões que se pode chegar com base nestes resultados. E nesse capítulo se discute se os objetivos foram alcançados. Por último, também são apresentados os trabalhos futuros.

Na seqüência, são apresentados como anexo o esquema do circuito eletrônico e as referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 REVISÃO DA LITERATURA

Para melhor compreender o que se trata neste trabalho, é necessário que se revise os assuntos envolvidos, assim sendo, esta sessão apresenta o trabalho de outros autores nesta área.

2.1.1 Detectores de metais

2.1.1.1 Detectores com bobinas envolventes

Estes detectores de metal são extensivamente utilizados para detectar a presença de objetos de metal indesejados na comida industrializada (YAMAZAKI, NAKANE e TANAKA, 2002). Em um detector típico, as bobinas são arranjadas coaxialmente, com uma bobina transmissora no centro e duas receptoras nas extremidades.

As bobinas receptoras são conectadas a um amplificador diferencial. Quando o campo magnético gerado na bobina transmissora é perturbado por um objeto de metal, a amplitude e a fase da tensão de saída do amplificador diferencial mudam, e isto indica a detecção de um metal.

A relação entre a amplitude e a fase da saída está diretamente ligada às propriedades eletromagnéticas do metal. Assim, é possível determinar propriedades como tamanho, condutividade e permeabilidade dos objetos metálicos.

A configuração de um detector de metais deste tipo é mostrada na Figura 3. Três bobinas são arranjadas coaxialmente a uma distância uniforme. Cada bobina é uma antena de uma única espira. Uma corrente sinusoidal é fornecida à bobina transmissora por um oscilador. As bobinas receptoras são conectadas a um amplificador diferencial.

Quando não existe nenhum objeto metálico nas proximidades, a tensão de saída em ambas as bobinas receptoras é a mesma, e a saída do amplificador diferencial permanece em

zero. Quando ruídos externos são sobrepostos à tensão de saída das bobinas receptoras, a saída diferencial continua em zero, pois as saídas induzidas de cada uma das duas bobinas cancelam-se mutuamente no amplificador.

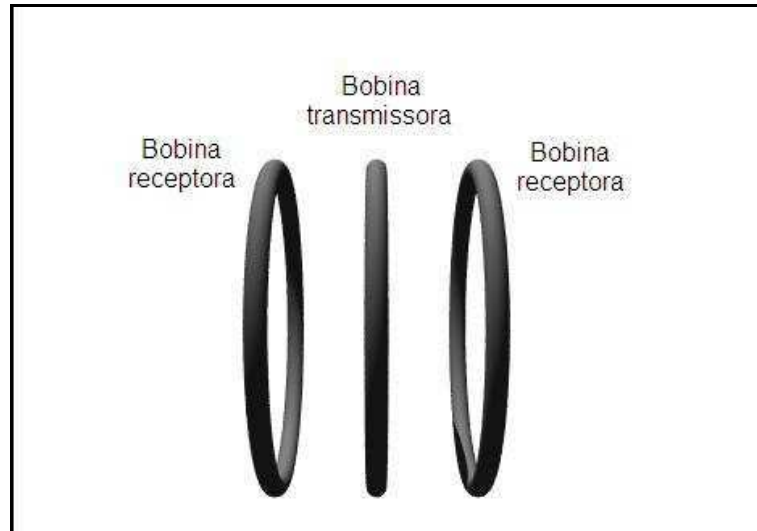


Figura 3: Posição das bobinas no detector de metais.

Quando existe um objeto metálico nas proximidades das três bobinas, uma corrente é induzida, neste objeto, pelo campo magnético gerado pela bobina transmissora. O campo magnético gerado pela corrente no metal induz uma diferença de tensão entre as bobinas receptoras, proporcional à diferença de distância entre o metal e cada uma delas.

A detecção de objetos de metal com este método utiliza a diferença de fase entre a bobina transmissora e a saída do amplificador diferencial, além da amplitude da tensão na saída do amplificador. A tensão de saída do oscilador e a saída do comparador são conectadas a um comparador de fase. O efeito das propriedades eletromagnéticas e o tamanho da peça de metal são detectados através das mudanças de amplitude e fase na tensão de saída do amplificador diferencial.

A forma de onda mostrada na Figura 4 é uma saída característica de tensão do amplificador diferencial depois de filtrada e em módulo. Nesta figura é possível observar que existem dois picos de tensão bem salientes, que indicam a passagem da amostra por cada uma das bobinas receptoras. Entre estes dois picos, existe uma região onde a tensão se aproxima de zero, isto acontece quando a amostra está entre as duas bobinas receptoras e a tensão induzida é igual nas duas.

Este arranjo, em que as amostras a serem detectadas passam pelo centro das bobinas, é muito eficiente e tem grande previsão e estabilidade (YAMAZAKI, NAKANE e TANAKA,

2002), porém torna o sistema como um todo mais caro, mais sensível e mais difícil de ser implantado.

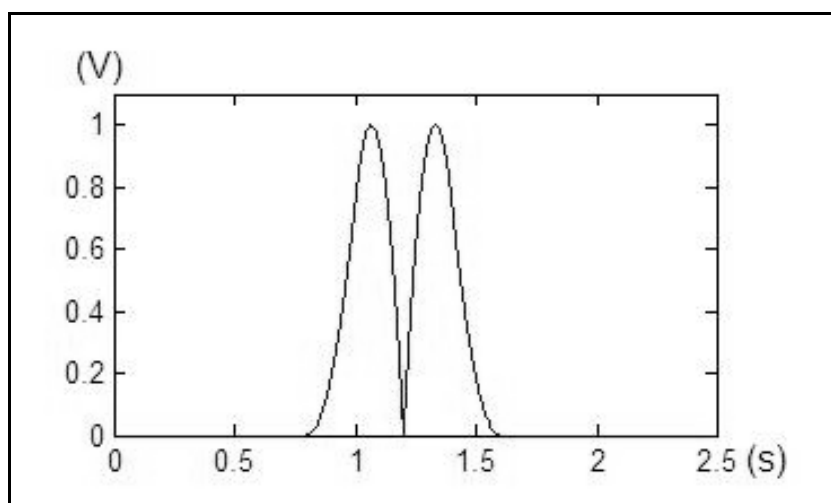


Figura 4: Tensão na saída do amplificador.

Também a diferença de fase entre o sinal transmitido e o sinal captado tem uma forma característica que é mostrada na Figura 5.

Tanto as formas de onda de tensão, como as formas de onda de fase, variam em amplitude e também em forma conforme as características dos metais detectados.

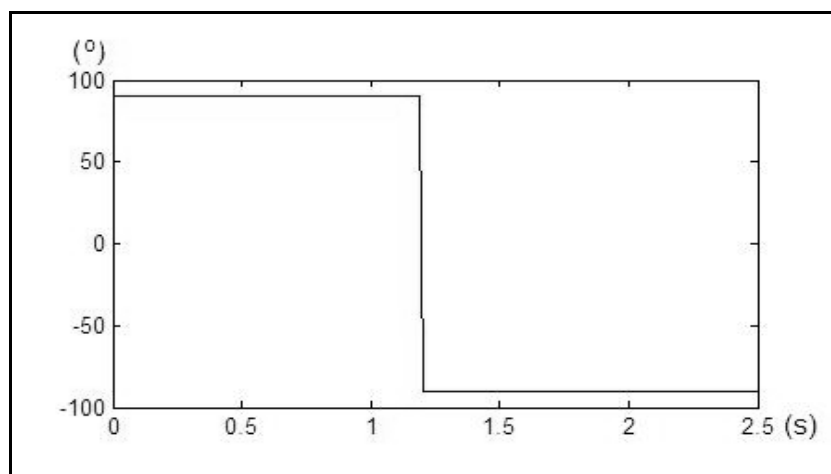


Figura 5: Fase do sinal detectado.

É possível observar que a fase sofre uma inversão, passando de noventa graus positivos para noventa graus negativos. Esta transição ocorre no momento em que a amostra deixa de estar mais próxima de uma bobina receptora e passa a estar mais próxima da outra.

2.1.1.2 Detectores com bobinas planas

O desempenho dos detectores varia de uma aplicação para outra (SILVESTER 1996). Sensibilidade a partículas pequenas de metal é essencial no controle de qualidade, principalmente na indústria alimentícia. Por outro lado, em aplicações militares e em segurança, onde os objetos que se deseja detectar são maiores, a principal preocupação é a uniformidade de sensibilidade para evitar que os sensores tenham pontos cegos. Nestes tipos de aplicações, nem sempre é possível utilizar bobinas envoltivas, por exemplo, na detecção de minas terrestres. A dimensão dos objetos que podem ser detectados depende da sensibilidade do equipamento e da forma das bobinas.

A solução é utilizar um arranjo diferente de bobinas, onde tanto o elemento transmissor como os elementos receptores estão num mesmo plano. A Figura 6 mostra um conjunto composto por uma bobina receptora e uma transmissora.

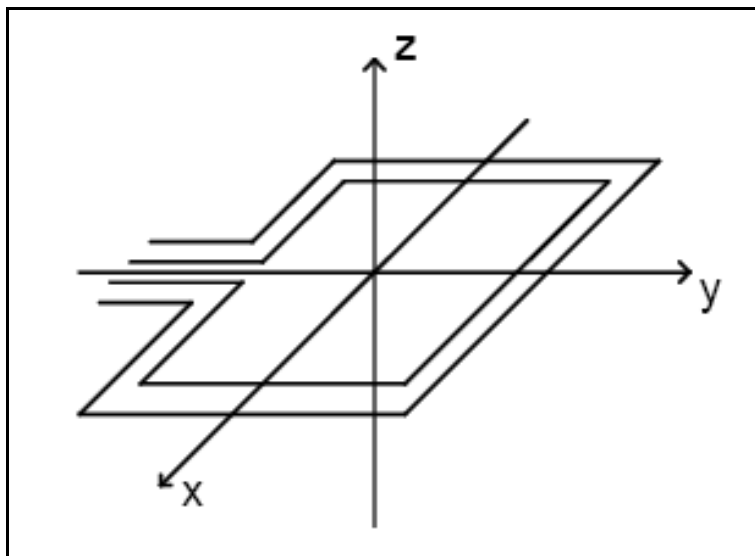


Figura 6: Conjunto simples de bobinas planas.

O conjunto composto por uma bobina transmissora e uma receptora apresenta uma deficiência, mesmo sem metal nas proximidades a tensão induzida não é zero (SILVESTER 1996). Este problema pode ser solucionado facilmente utilizando duas bobinas receptoras, cada uma delas cobrindo metade da área da bobina transmissora. Quando conectadas de forma apropriada, as tensões induzidas são iguais e se anulam. Outra solução ainda mais simples é construir a bobina receptora em forma de oito, assim não havendo nenhum metal nas

proximidades, a tensão induzida nos dois laços é igual e a resultante nos terminais é zero. A Figura 7 apresenta este arranjo de bobinas.

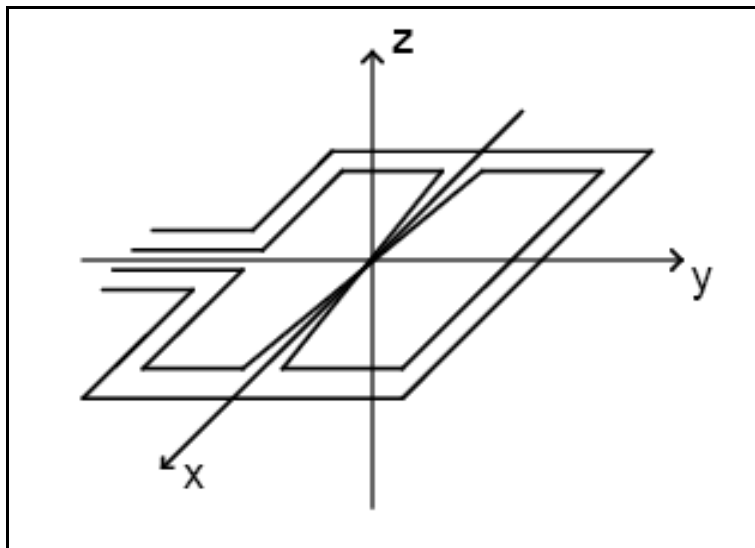


Figura 7: Bobina receptora em forma de oito.

A sensibilidade deste tipo de detector de metais varia com a distância entre a amostra e a bobina e com a posição. Para a bobina da Figura 6, temos o mapa de sensibilidade mostrado na Figura 8. Considere que a amostra se desloca ao longo do eixo y e a figura apresenta o plano y, z.

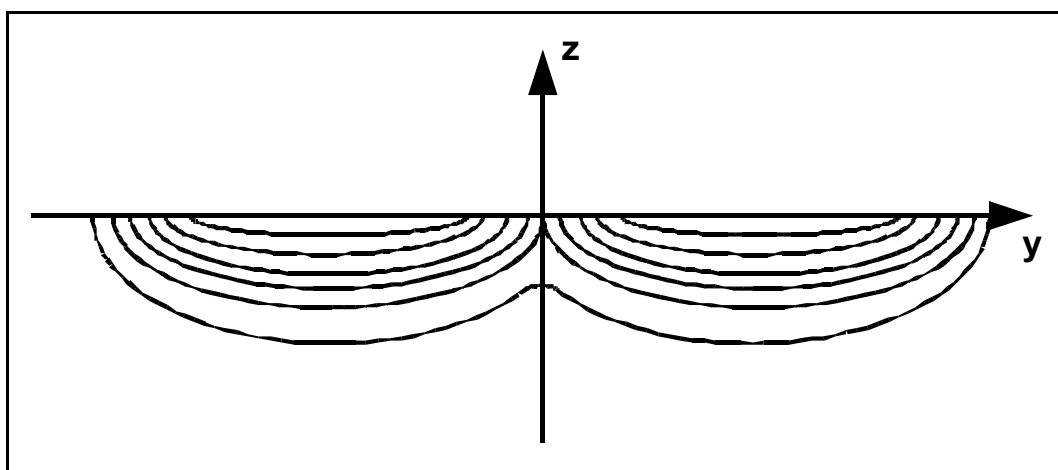


Figura 8: Mapa de sensibilidade para duas bobinas.

É possível observar que os pontos de maior alcance são próximos as espiras das bobinas.

Já para detectores que utilizam bobinas receptoras em forma de oito o mapa de sensibilidade é diferente. A Figura 9 mostra o plano y, z e, diferente do caso anterior, agora podemos notar um ponto cego em $y=0$.

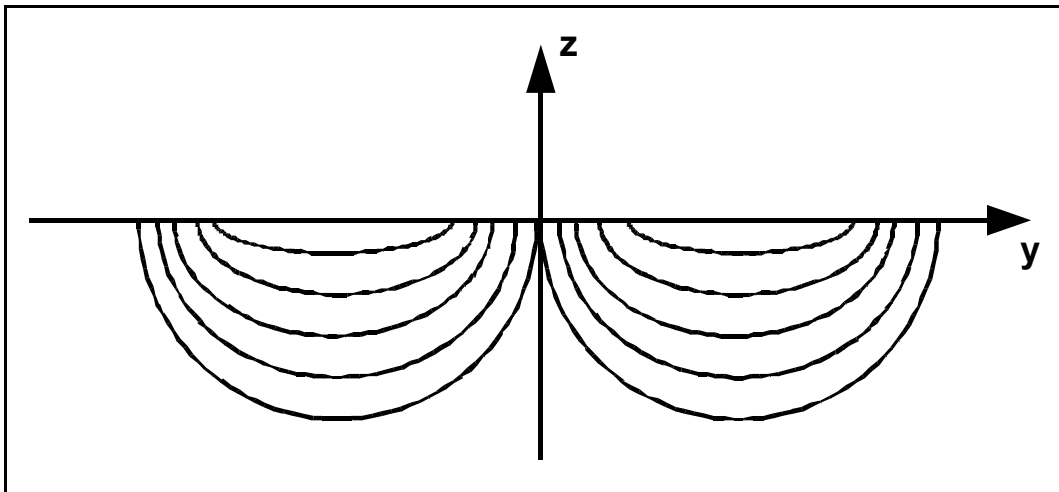


Figura 9: Mapa de sensibilidade para bobina em forma de oito.

Também é possível observar a variação da sensibilidade para detectores com bobinas em oito observando a Figura 10, que apresenta o mapa de sensibilidade no plano x, y . Observando estes mapas de sensibilidade, é fácil entender por que as amostras a serem detectadas precisam se deslocar pelo eixo y , pois só assim é impossível que um ponto cego cause uma falha na detecção (SILVESTER e OMERAGIC 1995).

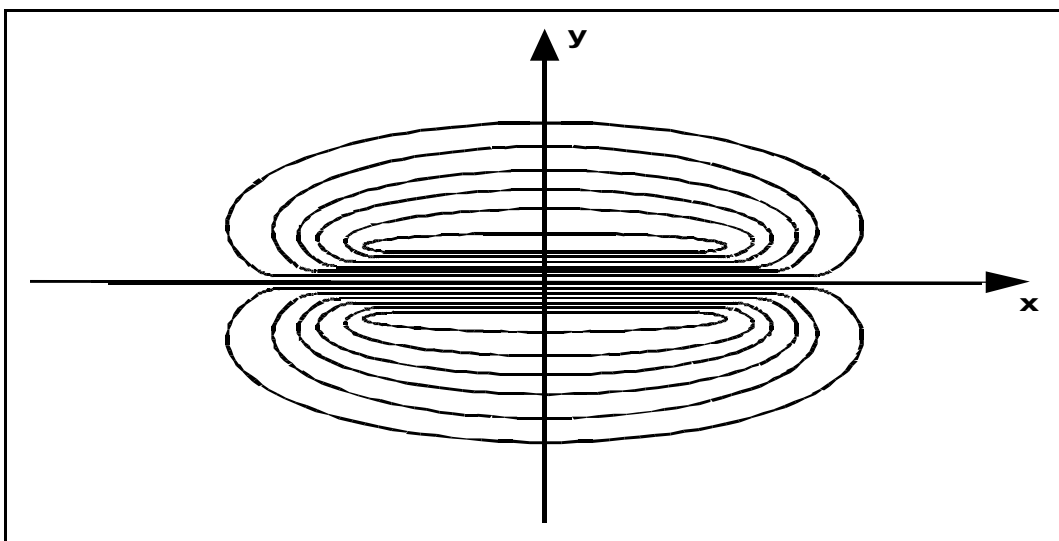


Figura 10: Mapa de sensibilidade no plano x, y .

Os circuitos utilizados para tratar os sinais dos detectores de metais construídos com bobinas planas são os mesmos utilizados nos detectores com bobinas envoltivas, com exceção dos detectores com apenas uma única bobina receptora, onde um circuito adicional é necessário para retirar o valor médio, que não é zero. Para os outros casos, as formas de onda de tensão e fase apresentadas anteriormente continuam sendo válidas.

2.1.1.3 Limitações dos detectores de metais

Os detectores de metais têm algumas limitações quanto à sensibilidade e à estabilidade. Os limites quanto à sensibilidade dizem respeito ao tamanho da amostra de metal que é possível detectar sem falsos disparos. Este limite é atingido quando o nível de tensão na saída do amplificador diferencial durante a passagem do metal é da mesma ordem do nível de ruído inerente à operação do equipamento, pois assim fica impossível diferenciar o sinal do ruído. Outro fator limitante é a estabilidade, pois dependendo das características de instalação, do ambiente e da qualidade dos filtros, é possível que ocorram falsos disparos, obrigando assim os operadores a reduzir a sensibilidade do equipamento. Estes falsos disparos são causados normalmente por vibrações mecânicas ou por indução de ruídos nas bobinas e nos circuitos do equipamento.

Outro fator que limita a sensibilidade dos detectores de metais é o chamado efeito do produto (GRAY 1994). Este problema ocorre quando o produto que passa pelo detector de metais tem características de condutividade parecidas com as de um metal, por exemplo, produtos com embalagens metalizadas, componentes ferromagnéticos do solo na detecção de minas (DAS 2006) e assim por diante. Diminuir a sensibilidade dos equipamentos para evitar falsos disparos por características do produto pode fazer com que partículas de metal passem despercebidas, o que causa dificuldades operacionais. Cada material em particular gera efeitos do produto característicos, com amplitude e fase bem definidas. Deste modo é possível ajustar o equipamento para ignorar este sinal de fundo e assim conseguir sensibilidade suficiente para detectar contaminações por metal.

Equipamentos modernos podem se auto ajustar para ignorar os efeitos do produto e assim maximizar sua sensibilidade.

2.1.2 Filtros casados

Em sistemas de radar, sistemas de comunicação e outras aplicações do gênero, é comum surgir a necessidade de se detectar a presença de um determinado sinal em meio a ruído aleatório (FANTE 1988). Para isso é necessário sintetizar um filtro capaz de maximizar a relação sinal/ruído e este filtro é o filtro casado.

A função do filtro casado é maximizar a relação sinal/ruído. Esta relação é máxima quando o filtro aplicado ao sinal tem resposta ao impulso igual ao sinal recebido invertido no tempo.

Um filtro ideal, ou com resposta ao impulso infinita não é fisicamente realizável, é necessário fazer uma aproximação.

Os filtros casados são ótimos detectores para períodos curtos de sinais conhecidos, onde o ruído é branco e com media igual a zero. Isto porque este filtro é equivalente a calcular a correlação entre um sinal conhecido e o sinal recebido, na forma de uma janela deslizante.

A saída do filtro apresenta valores pequenos para sinais que não tenham correlação e picos de valor maior para regiões da entrada que se aproximem do sinal conhecido. Quanto maior a amplitude do pico na saída, maior é a semelhança entre a entrada e o sinal procurado.

A resposta ao impulso de um filtro casado é a inversão no tempo do sinal conhecido a ser detectado. Normalmente, é computacionalmente mais eficiente detectar formas de onda conhecidas utilizando filtros digitais FIR (*Finite Impulse Response*), e não calculando a correlação. Isto é verdade para formas de onda conhecidas muito longas onde o tamanho da resposta ao impulso torna o filtro casado irrealizável.

Assim, um filtro casado é uma boa opção quando a amostra de sinal conhecido é pequena o suficiente para que a resposta ao impulso seja realizável na prática e quando o ruído presente no sinal for branco.

Outro fator importante é que, para utilizarmos filtros casados, é necessário que a atenuação do sinal e o nível do ruído não sejam variantes no tempo. Se estas condições forem satisfeitas, os filtros casados são a melhor escolha para realizar a detecção do sinal.

Aplicações onde as condições necessárias para a aplicação de filtros casados são satisfeitas são, por exemplo, modems, onde os símbolos transmitidos e recebidos são conhecidos, e radar ou sonar ativo, onde o eco dos sinais transmitidos deve ser detectado.

2.1.2.1 Definição de filtros casados

Se $s(t)$ é uma forma de onda qualquer então um filtro que é casado com $s(t)$ é, por definição, aquele cuja resposta ao impulso é (TURIN 1960) dada na Equação 1.

$$h(\tau) = ks(\Delta - \tau) \quad (1)$$

Onde k e Δ são constantes arbitrárias. O sinal $h(\tau)$ pode ser visto na Figura 11, em (a) temos a forma de onda $s(t)$, com duração de t_1 a t_2 . Invertendo $s(t)$ no tempo e definindo $\tau = -t$ obtemos o sinal $s(-\tau)$, mostrado em (b). Se esta for atrasada de Δ segundos e sua amplitude for multiplicada por k temos a forma de onda resultante (c) da Figura 11, que é a resposta ao impulso do filtro casado da Equação 1.

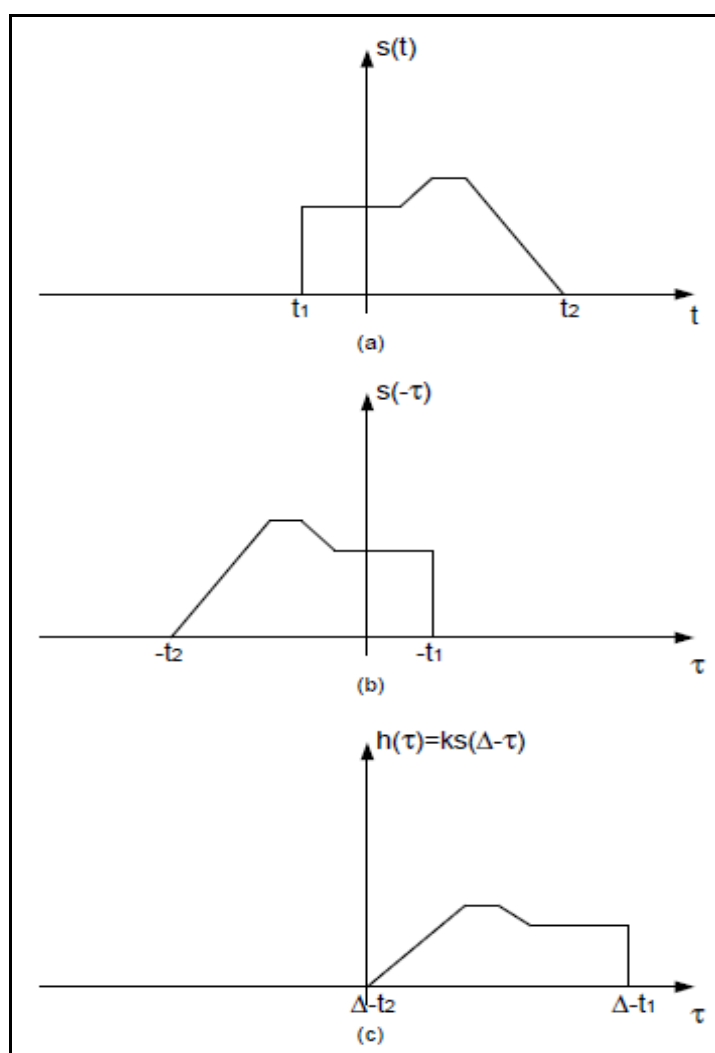


Figura 11: Etapas da formação de $h(\tau)$.

A função de transferência do filtro casado, que é a transformada de Fourier da resposta ao impulso, tem a forma da Equação 2.

$$\begin{aligned}
 H(j2\pi f) &= \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \\
 &= k \int_{-\infty}^{\infty} s(\Delta - \tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \\
 &= k e^{-j2\pi f\Delta} \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau') e^{-j2\pi f\tau'} d\tau'
 \end{aligned} \tag{2}$$

A seguinte substituição $\tau' = \Delta - \tau$ foi realizada na Equação 2. Agora o espectro de $s(t)$ (sua transformada de Fourier) é:

$$S(j2\pi f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt \tag{3}$$

A comparação de Equação 2 com a Equação 3 revela, então, que:

$$H(j2\pi f) = kS(-j2\pi f) e^{-j2\pi f\Delta} = kS^*(j2\pi f) e^{-j2\pi f\Delta} \tag{4}$$

A Equação 4 mostra que, com exceção de um possível fator de amplitude ou atraso na forma $ke^{-j2\pi f\Delta}$, a função de transferência de um filtro casado é o conjugado complexo do espectro do sinal a que é combinado. Por esta razão, um filtro casado é chamado freqüentemente de filtro conjugado.

2.1.2.2 Filtros casados adaptativos

Existem situações práticas em que é impossível saber antecipadamente qual é o formato do sinal a ser detectado (PADAN 1982). Isto acontece, por exemplo, em sinais biomédicos como eletrocardiogramas, onde o sinal a ser reconhecido ou é desconhecido ou é apenas parcialmente conhecido. Em ambos os casos, os filtros casados tradicionais são

ineficientes. Nestes casos, o receptor deve iniciar com uma performance ruim e conforme mais informações sobre o sinal são recebidas, este receptor deve ir adaptando-se e melhorando sua performance. Estes tipos de filtros casados são os adaptativos. Existem dois tipos de filtros casados adaptativos, um supervisionado, onde um operador avalia a qualidade do sinal detectado e ajuda o filtro a se adaptar, e outro onde o filtro automaticamente determina qual a melhor função de transferência para detectar o sinal em questão.

Um exemplo de aplicação de filtros casados adaptativos é no processamento de sinais de radar (GERLACH, BLUNT e PICCIOLO 2004). Nestes casos, uma matriz de covariância é usada para encontrar o ajuste ideal onde a relação sinal/ruído da saída é máxima. Para que este sistema funcione, as primeiras amostras do sinal recebido são usadas para formar a matriz de covariância, em seguida, o sistema passa a operar de forma otimizada.

2.2 TÓPICOS TEÓRICOS

2.2.1 Origem dos filtros casados

Os filtros casados surgiram da situação mostrada na Figura 12 (TURIN 1960). Pode-se supor que um sinal $x(t)$ seja composto por ruído branco $n(t)$ e um sinal $s(t)$, que pode ser, por exemplo, o sinal de retorno de um radar.

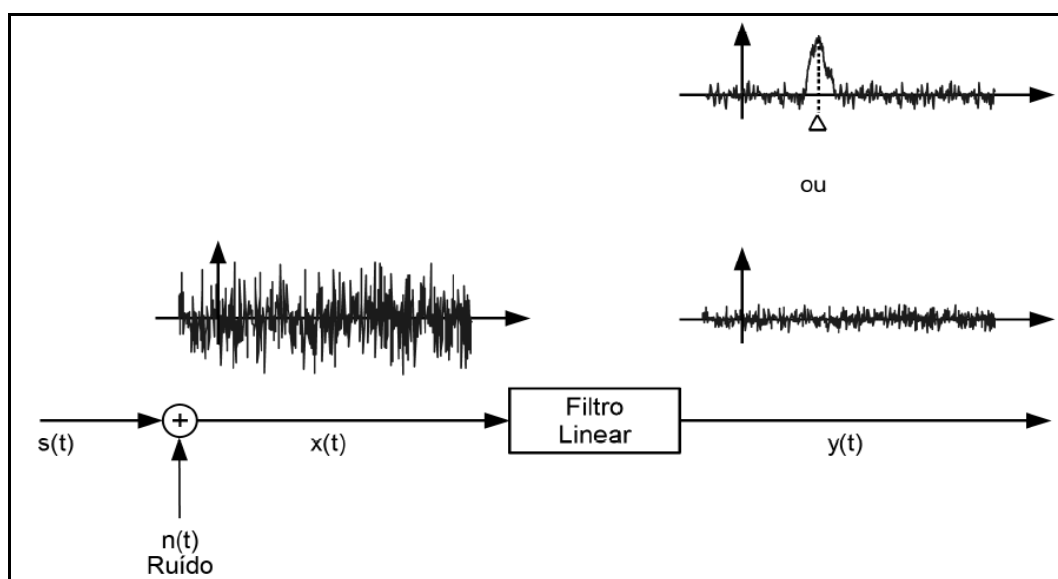


Figura 12: Aplicação típica de filtros casados.

O problema consiste em operar $x(t)$ através de um filtro linear e determinar se o sinal $s(t)$ está ou não presente. Neste caso, a saída do filtro em um instante $t = \Delta$ é consideravelmente maior se $s(t)$ estiver presente, em comparação à mesma saída, sem a presença de $s(t)$. Assumindo que o filtro é linear, podemos dizer que sua saída $y(t)$ possui um componente $yn(t)$ que corresponde à entrada $n(t)$ e, se o sinal $s(t)$ estiver presente, também possui um componente $ys(t)$ correspondente a esta entrada. Uma forma simples de verificar o quanto o sinal de saída é maior na presença de $s(t)$ é observar que o filtro faz a potência instantânea de $ys(\Delta)$ a maior possível se comparada à potência média de $n(t)$ no tempo Δ .

Matematicamente, é possível provar que o filtro casado é apropriado para esta situação (TURIN 1960, BAKER 1994). Assim, segue a dedução matemática que demonstra que o filtro casado maximiza a relação sinal/ruído:

Assumindo que $n(t)$ é estacionário e que $G(j2\pi f)$ é a função de transferência do filtro, a densidade espectral de potência do ruído de saída é $(N_0/2) |G(j2\pi f)|^2$. A potência do ruído de saída é então dada pela Equação 5.

$$\frac{N_0}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |G(j2\pi f)|^2 df \quad (5)$$

e, se $S(j2\pi f)$ é o espectro do sinal de entrada, então $S(j2\pi f)G(j2\pi f)$ é o espectro do sinal de saída, e $y_s(\Delta)$ é a transformada inversa de Fourier disto, em $t = \Delta$. Que é dada na Equação 6.

$$y_s(\Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} S(j2\pi f) G(j2\pi f) e^{j2\pi f \Delta} df \quad (6)$$

A relação entre o quadrado da Equação 6 e a Equação 5 é a relação de potência a ser maximizada, conforme a Equação 7.

$$\rho = \frac{2 \left[\int_{-\infty}^{\infty} S(j2\pi f) G(j2\pi f) e^{j2\pi f \Delta} df \right]^2}{N_0 \int_{-\infty}^{\infty} |G(j2\pi f)|^2 df} \quad (7)$$

Reconhecendo que a integral no numerador é real e identificando $G(j2\pi f)$ com $f(x)$ e $S(j2\pi f)e^{j2\pi f\Delta}$ com $g(x)$ na inequação de Schwarz podemos fazer

$$\left| \int f(x)g(x)dx \right|^2 \leq \int |f(x)|^2 dx \int |g(x)|^2 dx \quad (8)$$

onde obtém-se da Equação 7:

$$\rho \leq \frac{2}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} |S(j2\pi f)|^2 df \quad (9)$$

como $|S(j2\pi f)|^2$ é a densidade espectral de energia de $s(t)$, a integral na Equação 9 é a energia total, E , em $s(t)$. Então:

$$\rho \leq \frac{2E}{N_0} \quad (10)$$

para que a igualdade na Equação 8, e conseqüentemente na Equação 9 e na Equação 10, sejam verdadeiras, é necessário $f(x) = kg^*(x)$, isto é, que a Equação 11 seja verdadeira.

$$\begin{aligned} G(j2\pi f) &= kS^*(j2\pi f)e^{-j2\pi f\Delta} \\ \therefore g(t) &= ks^*(\Delta - t) \end{aligned} \quad (11)$$

Assim quando o filtro é casado com $s(t)$, um valor máximo de ρ é obtido. Pode-se observar então, que a igualdade na Equação 8 é verdadeira somente quando $f(x) = kg^*(x)$, com isso o filtro casado da Equação 11 representa o único tipo de filtro linear que maximiza ρ .

É possível notar que não foi discutida a estatística do ruído, foi assumido somente que o ruído é brando e estacionário, com densidade de potência $N_0/2$. Se ele não for branco e possuir uma densidade espectral de potencia qualquer $|N(j2\pi f)|^2$, uma dedução parecida com a anterior leva para a solução da Equação 12.

$$G(j2\pi f) = \frac{kS^*(j2\pi f)e^{-j2\pi f\Delta}}{|N(j2\pi f)|^2} \quad (12)$$

Também é possível chegar a esta conclusão intuitivamente, da seguinte maneira. Se a entrada $x(t)$ da Figura 12 é aplicada a um filtro com função de transferência $1/N(j2\pi f)$, o ruído em sua saída será branco. Entretanto, a componente do sinal será distorcida, tendo agora o espectro $S(j2\pi f)/N(j2\pi f)$.

Com base na discussão anterior sobre sinais com ruído branco, isto é razoável e então, se em seguida a este filtro de ruído branco for adicionado um filtro casado para o espectro do sinal distorcido, isto é, o filtro $kS^*(j2\pi f)e^{-j2\pi f\Delta}/N^*(j2\pi f)$. A cascata do filtro de ruído branco e do filtro casado é certamente a solução da Equação 12.

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGIA

3.1 REQUISITOS DO TRABALHO PROPOSTO

Para comprovar que os filtros casados são adequados para tratar os sinais nos detectores de metais foi necessário elaborar um protótipo que empregasse esta técnica. Os requisitos necessários para este equipamento são:

- Dimensões reduzidas, empregando bobinas planas para facilitar a instalação e diminuir os custos.
- Confiabilidade elevada, para que não ocorram falsos disparos. Falsos disparos podem causar grandes problemas em aplicações onde o fluxo contínuo de produto é importante para o processo. Como, por exemplo, nas fábricas de ração, onde a dosagem de nutrientes depende do volume de produto transportado.
- Alto desempenho. O detector deve ser capaz de operar em condições adversas, como ambientes com muito ruído elétrico, com vibrações mecânicas e com grandes variações de temperatura. Também deve ser tolerante a várias velocidades de passagem do produto.
- O equipamento deve ser ajustável ao ambiente onde for instalado, ignorando assim componentes de metal da estrutura de suporte e de outros equipamentos do local.
- A sensibilidade do equipamento deve ser adequada para aplicações industriais tais como, fábricas de ração, pedreiras, fábricas de papel e outras do gênero. A sensibilidade é o foco principal, pois os outros requisitos dependem deste para serem satisfeitos. O detector deve ser capaz de detectar amostras de metal com alguns milímetros de diâmetro, inseridas em um grande volume de produto.
- Outro requisito importante é o custo, pois de nada serve um equipamento de qualidade se o custo inviabiliza sua produção ou comercialização. O foco deste

trabalho é um equipamento de baixo custo, que possa ser empregado em diversas áreas da automação industrial.

- Conectividade com outros equipamentos. O detector de metais deve ser capaz de se comunicar de forma simples com outros equipamentos, para que o controle do processo possa tomar as devidas providências quando um metal for detectado.

3.2 TRABALHO DESENVOLVIDO

O trabalho desenvolvido satisfaz os requisitos empregando novas técnicas e novos componentes. O grande diferencial é a utilização de filtros casados para maximizar a relação sinal/ruído. Assim, é possível aumentar a sensibilidade e a estabilidade dos detectores mesmo que o sistema de detecção seja composto por bobinas planas. O que torna o sistema mais barato e mais fácil de instalar. Outro fator que contribui para diminuir o custo é a utilização de um DSP. Um DSP de baixo custo substitui todo um circuito analógico complexo usado comumente nos detectores comerciais e com muitas vantagens. Outras vantagens de se usar um processador digital são o ótimo desempenho e a redução das dimensões físicas do circuito em comparação aos detectores tradicionais. Outra facilidade deste sistema é a parametrização via LCD (*Liquid Crystal Display*), o que facilita os ajustes e a operação.

A questão da conectividade foi resolvida de forma bastante simples, o detector construído oferece como saída dois contatos de relé, um normalmente fechado e outro normalmente aberto. A utilização de contatos favorece a integração com outros sistemas de automação, independente da tensão ou do tipo de controlador usado.

3.3 MATERIAIS E INFRA-ESTRUTURA

3.3.1 Computador e softwares

Durante todas as fases deste trabalho o computador foi uma ferramenta muito importante. Ele foi utilizado nas pesquisas, no desenvolvimento dos algoritmos, nas simulações, na confecção do protótipo e na programação do DSP. O computador usado neste

projeto é um notebook HP, modelo Pavilion dv4000, com 1GBytes de memória RAM, 120GBytes de disco rígido e processador Centrino de 1,73GHz. O sistema operacional deste computador é o Windows XP Professional, *Service Pack 2*. A Figura 13 mostra o computador utilizado.



Figura 13: Computador usado no projeto.

Também foram utilizados vários softwares, os mais importantes são listados a seguir.

- **MATLAB:** O MATLAB versão 7.2.232 (2006a) é um software para simulação matemática de sistemas produzido pela MathWorks (www.mathworks.com). Este software foi amplamente utilizado na simulação dos filtros casados, bem como no desenvolvimento do algoritmo utilizado no protótipo.
- **CodeWarrior IDE:** O CodeWarrior IDE versão 5.6.1.1658 é um ambiente de desenvolvimento, simulação e depuração para DSPs. Este ambiente de desenvolvimento foi utilizado na codificação do software do DSP, bem como na simulação e depuração do algoritmo do filtro casado.
- **SPICE:** Software que faz parte do OrCAD, fabricado pela CADENCE. Foi utilizado para simular os circuitos analógicos.
- **EAGLE:** O Eagle (Easily Applicable Graphical Layout Editor) Version 4.16r2 Professional Edition, foi usado no desenho dos esquemas eletrônicos e na confecção do layout da placa de circuito impresso do protótipo.

3.3.1.1 Equipamentos de bancada

Para a construção e para os testes do protótipo foram usados alguns equipamentos de bancada, equipamentos estes fornecidos pela empresa Automatic. Dentre estes equipamentos pode-se destacar dois, uma fonte ajustável de bancada e um osciloscópio digital. A fonte de bancada usada é fabricada pela Minipa, modelo MPL-3033, com uma saída fixa de cinco Volts e três Ampères e duas saídas variáveis de zero a 30 Volts e três Ampères. A Figura 14 mostra este equipamento.



Figura 14: Fonte de bancada.

O osciloscópio digital usado é fabricado pela Minipa, modelo MO-1150D, de 150MHz. A Figura 15 mostra este equipamento.

3.3.1.2 Placa de demonstração do DSP

Para desenvolver e testar o algoritmo do filtro casado foi usado uma placa de demonstração do DSP MC56F8013 da Freescale. Um diagrama de blocos desta placa é apresentado na Figura 16.

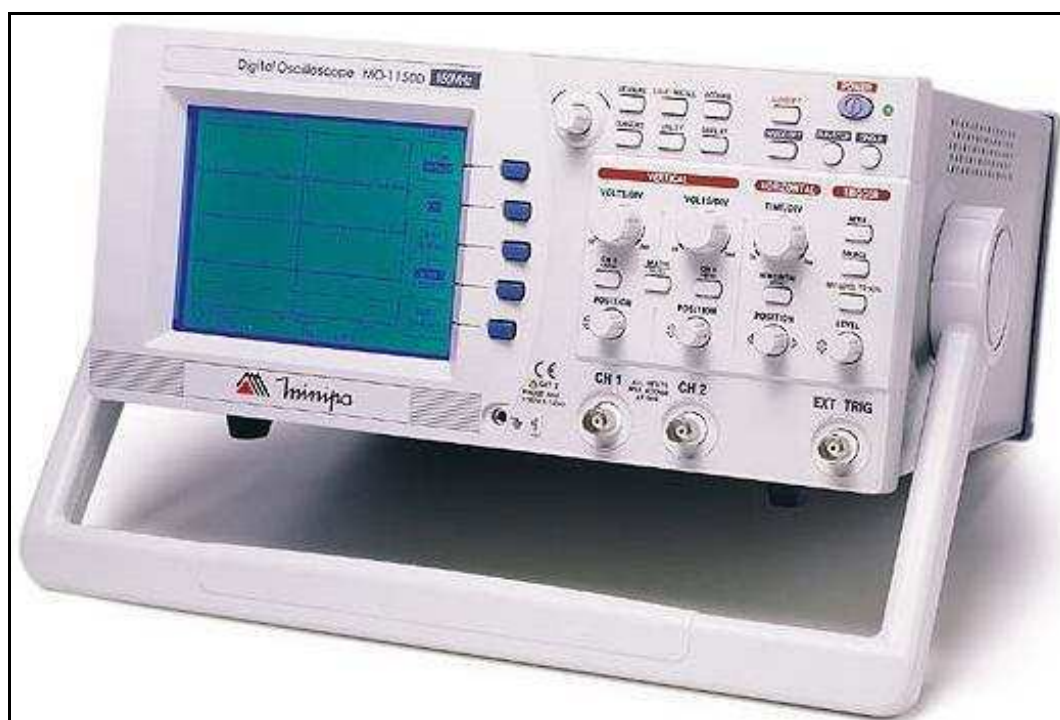


Figura 15: Osciloscópio digital.

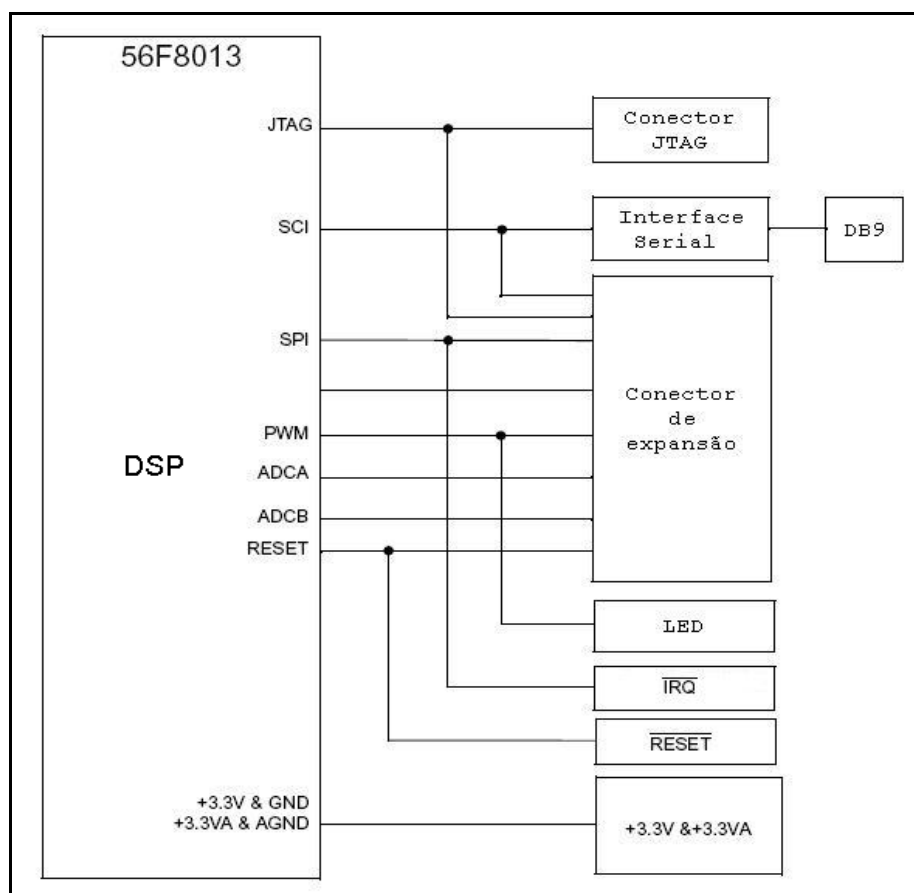


Figura 16: Diagrama de blocos da placa de demonstração.

Esta placa de demonstração tem as seguintes características:

- Processador digital de sinais MC56F8013, de 16-bit +3.3V a 60MHz
- Porta JTAG para programação e depuração do software
- Interface RS-232 para conexão externa
- Conector para acesso as saídas de PWM, ADC, SCI, SPI ou pinos de entrada e saída genéricos
- Regulador de tensão interno, permitindo a alimentação com fonte de 9V
- Um LED indicando que está ligado
- Seis LEDs para uso geral
- Botão para reset
- Dois botões para uso geral ou interrupções

A Figura 17 mostra esta placa de demonstração.

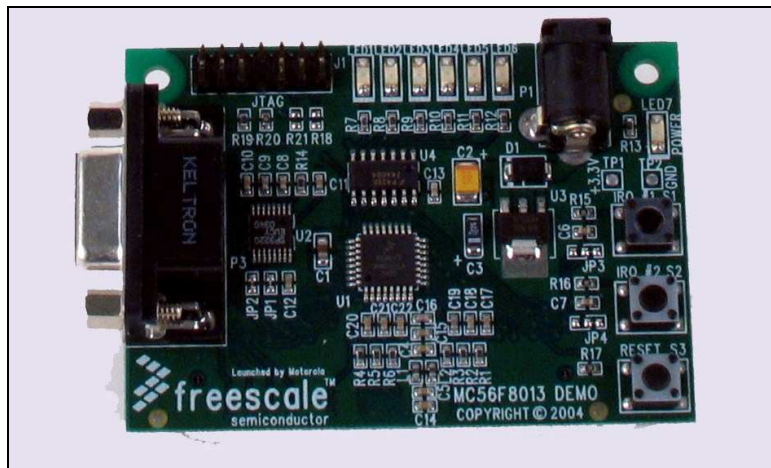


Figura 17: Placa de demonstração do DSP.

3.3.1.3 Esteiras transportadoras

Para realizar os testes do protótipo foram construídas duas esteiras transportadoras, uma pequena para ser utilizada na bancada e uma maior para realizar testes de campo. A esteira pequena pode ser vista na Figura 18, ela é movida por um motor de corrente contínua, assim sua velocidade pode ser variada conforme necessário.

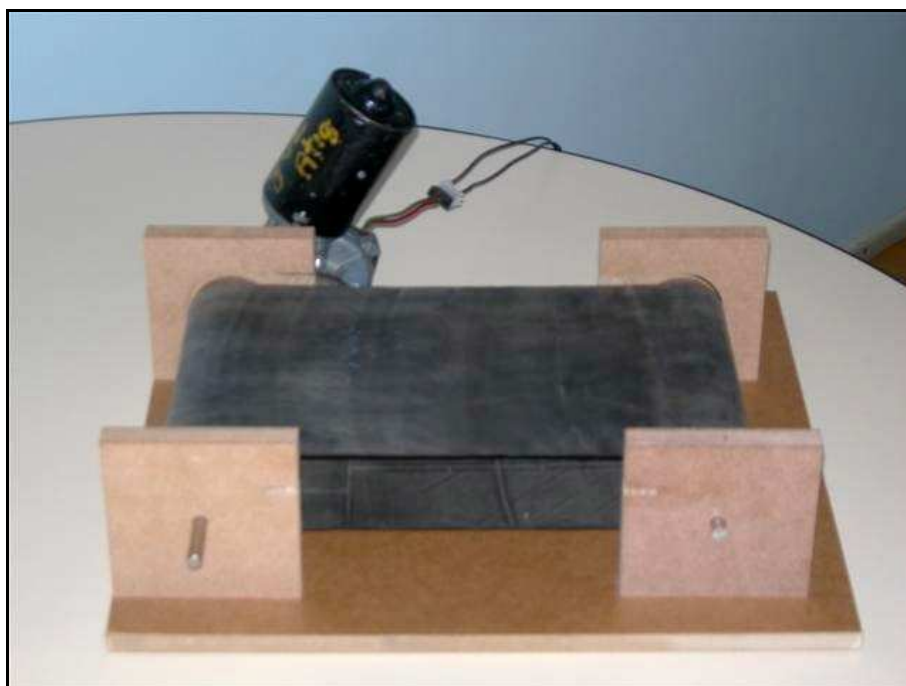


Figura 18: Esteira transportadora pequena.

A Figura 19 mostra a esteira transportadora usada para fazer os testes de campo. Esta esteira é movida por um motor trifásico controlado por um inversor de frequência, assim é possível controlar sua velocidade e fazer os testes nas mais variadas condições.



Figura 19: Esteira transportadora.

3.3.1.4 Detector de metais marca Shadow

Este é um detector de metais comercializado pela Automatic e foi usado para comparação. Para verificar as características de sensibilidade e confiabilidade do protótipo é necessário que se tenha um referencial, foi para isso que este equipamento foi usado. O detector usado é da marca Shadow, modelo KS04. A Figura 20 mostra este equipamento.



Figura 20: Detector de metais Shadow KS04.

Este detector utiliza uma bobina de detecção plana. A Figura 21 mostra a bobina usada nos testes em seu invólucro de resina epóxi.



Figura 21: Bobina de detecção usada no detector Shadow.

Conforme descrito nas motivações deste trabalho, este detector tem um custo elevado, em torno de R\$2100,00 e é de difícil ajuste. A Figura 22 mostra onde é feito o ajuste de sensibilidade.



Figura 22: Potenciômetros de ajuste da sensibilidade.

Outra inconveniência deste sistema é a dificuldade de instalação, pois se tratando de um circuito analógico e as tolerâncias dos componentes interferirem no funcionamento, são necessários vários ajustes internos. Na Figura 23 é possível observar os vários potenciômetros de ajuste presentes nas placas de circuito.



Figura 23: Potenciômetros de ajuste.

3.3.1.5 Impressora de plaquetas

Um equipamento importante na confecção do protótipo foi a impressora de plaquetas. Como descrito a seguir este equipamento foi usado na confecção da placa de circuito impresso.

3.4 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento deste trabalho dividiu-se em duas partes, a primeira delas é o software e a segunda é o hardware. Os parágrafos a seguir relatam em detalhes a realização de cada uma das partes.

3.4.1 Desenvolvimento do software

Para obter o protótipo final foram construídos vários algoritmos. Inicialmente foi desenvolvido o algoritmo do filtro casado no software Matlab. Um segundo passo foi traduzir o algoritmo para a linguagem C, empregada no DSP, e, finalmente, foi necessário programar toda a estrutura necessária para adquirir, tratar e processar os dados no DSP. Primeiramente, será abordada a construção do algoritmo do filtro casado no Matlab.

3.4.1.1 Algoritmo do filtro casado no Matlab

Como visto anteriormente, o filtro casado tem sua resposta ao impulso igual ao sinal que se deseja detectar invertido no tempo, portanto, utilizando o comando de filtro do Matlab é fácil efetuar a convolução entre um sinal de entrada e o inverso no tempo da amostra de sinal a ser detectada. Para criar um algoritmo apto a ser implementado em um DSP, foi necessário criar uma rotina de convolução própria, já que não se dispõe das rotinas prontas do Matlab no DSP. A Figura 24 mostra o trecho de código do Matlab onde a convolução é realizada sem a ajuda das funções prontas do Matlab.

```

for cont_x=1:size_x
    for cont_temp_x=size_h:-1:2
        temp_x(cont_temp_x)=temp_x(cont_temp_x-1);
    end
    temp_x(1)=xr(cont_x);
    y(cont_x)=0;
    for cont_h=1:size_h
        y(cont_x)=y(cont_x)+(h((size_h+1)-cont_h)*temp_x(cont_h));
    end
end
end

```

Figura 24: Algoritmo para realizar a convolução.

No trecho de código a variável *xr* é o sinal de entrada, e *size_x* indica o número de elemento neste vetor de entrada. A variável *h* contém os dados do filtro, *size_h* indica o numero de elementos em *h* e, por ultimo, *y* é a variável onde o resultado da convolução é armazenado.

O próximo passo foi converter este algoritmo para a linguagem C, de modo que o mesmo seja aplicável no DSP.

Esta conversão não criou maiores dificuldades, e o código resultante pode ser visto na Figura 25.

```

void matched(int *x, int *y, int *h, int s_x, int s_h)
{
    // *x   Ponteiro para os dados de entrada
    // *y   ponteiro para os dados de saída
    // *h   Ponteiro para os dados da amostra a ser detectada
    // s_x  numero de words em x
    // s_h  numero de words em h

    int cont_x;
    int cont_y;
    int cont_h;
    long temp;

    for(cont_y=0; cont_y<s_x; cont_y++)
    {
        cont_h=0;
        y[cont_y]=0;
        for(cont_x=cont_y-s_h+1; cont_x<s_x&&cont_h<s_h; cont_x++)
        {
            if(cont_x>=0)
            {
                temp=y[cont_y]+((long)x[cont_x]*(long)h[cont_h])/1000;
                if(temp>INT_MAX) y[cont_y]=INT_MAX;
                else
                    if(temp<INT_MIN) y[cont_y]=INT_MIN;
                    else y[cont_y]=(int)temp;
            }
            cont_h++;
        }
    }
}

```

Figura 25: Código em C para o filtro casado.

Para tornar mais claro o funcionamento desta parte do código a Figura 26 apresenta um fluxograma mostrando passo a passo como a convolução acontece.

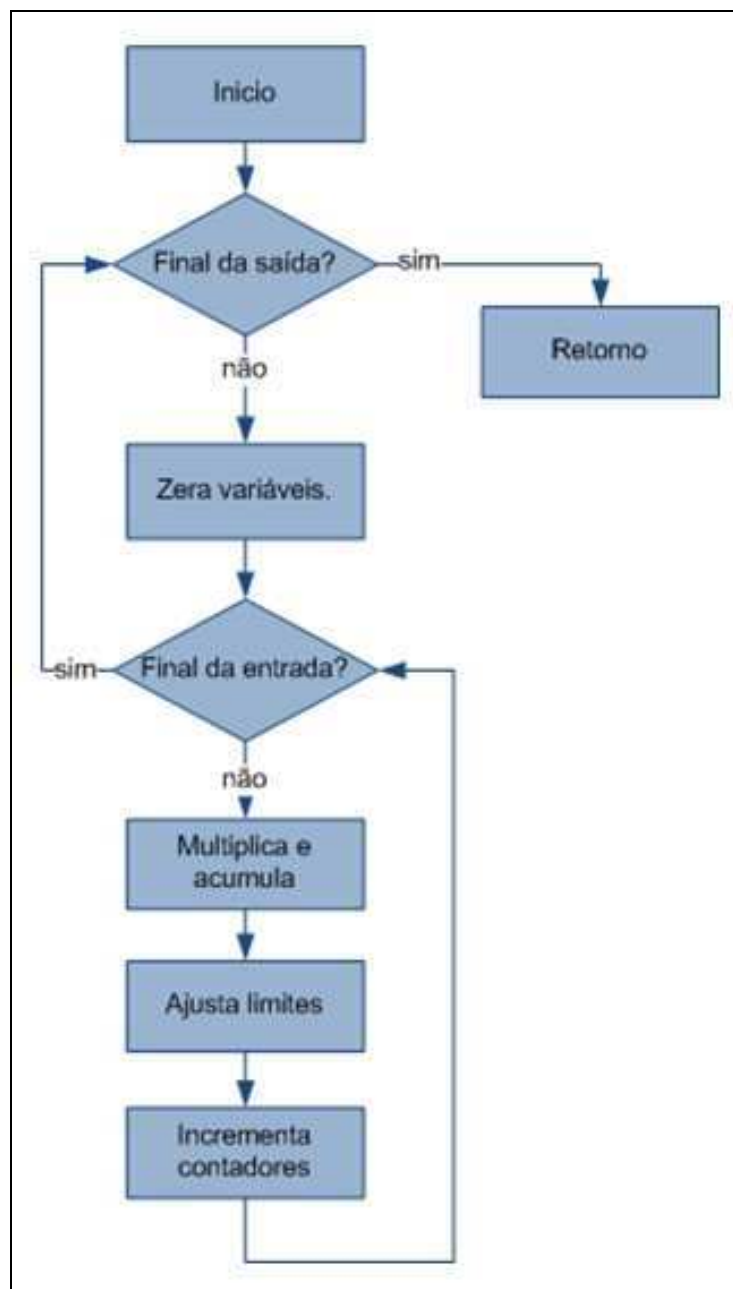


Figura 26: Fluxograma do filtro casado.

3.4.1.2 Algoritmo de controle do detector de metais

O software do detector de metais não é constituído apenas pelo algoritmo do filtro casado. Na realidade, o algoritmo do filtro é apenas uma pequena parte do código necessário. Para que o equipamento funcione adequadamente foi desenvolvido um programa que controla

todo o processo de detecção, desde a geração do sinal de 10 kHz para a bobina transmissora até a temporização da captura dos dados pelo conversor analógico digital, passando pela leitura das teclas, pela atualização da tela de cristal líquido etc. A frequência de 10 kHz foi adotada por ser uma frequência comum nos detectores industriais.

O fluxograma da Figura 27 resume o funcionamento do programa principal do detector de metais

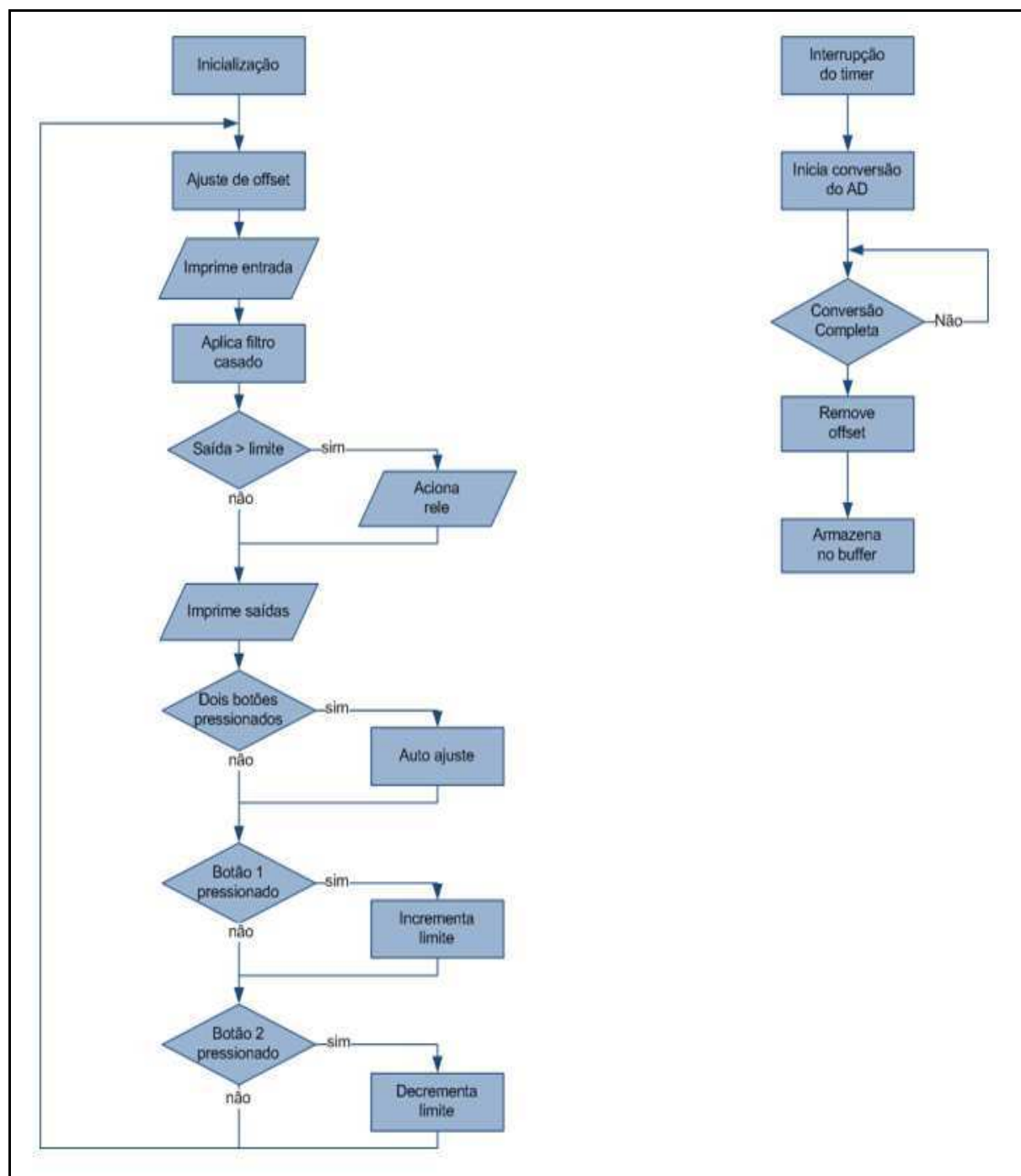


Figura 27: Fluxograma do programa principal.

O fluxograma apresenta o funcionamento do laço principal e da rotina de interrupção do temporizador, mas o DSP também é responsável por outras tarefas.

Outra função desempenhada pelo DSP no circuito é a geração do sinal de 10kHz que é enviado à bobina transmissora. Para este fim, é utilizada uma saída PWM do DSP com uma razão cíclica de 50% e uma frequência de 10kHz.

O sinal gerado é posteriormente filtrado e amplificado de forma a fornecer para a bobina transmissora um sinal senoidal.

A Figura 28 apresenta a tela de parametrização do PWM no ambiente de programação do DSP.

O ambiente de programação do DSP da freescale tem a vantagem de mascarar toda a parte de configuração dos periféricos do DSP. Estas ferramentas agilizam muito o desenvolvimento do programa, diminuindo o tempo de programação e diminuindo o número de erros.

Bean Items Visibility Help < >			
Properties Methods Events Comment			
<input checked="" type="checkbox"/>	Bean name	Pwm1	
<input checked="" type="checkbox"/>	PWM or PPG timer	PwMod3	PwMod3
<input checked="" type="checkbox"/>	Duty compare		
<input checked="" type="checkbox"/>	Output pin	GPIOA3_PWM3	GPIOA3_PWM3
<input checked="" type="checkbox"/>	Output pin signal		
<input checked="" type="checkbox"/>	Counter	PWM_Timer	PWM_Timer
<input checked="" type="checkbox"/>	Interrupt service/event	Disabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	Period	10 kHz	10 kHz
<input checked="" type="checkbox"/>	Starting pulse width	20 kHz	20 kHz
<input checked="" type="checkbox"/>	Initial polarity	low	
<input checked="" type="checkbox"/>	Iterations before action/event	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	Bean uses entire timer	no	
<input type="checkbox"/>	Initialization		
<input checked="" type="checkbox"/>	Enabled in init. code	yes	
<input checked="" type="checkbox"/>	Events enabled in init.	yes	

Figura 28: Tela de parametrização do PWM.

Em seguida, será descrito o circuito do filtro e do amplificador responsável pelo tratamento deste sinal.

A leitura dos sinais recebidos do circuito analógico é realizada por um conversor analógico digital de 12 bits, a Figura 29 apresenta a tela de parametrização do AD no ambiente de programação do DSP.

Bean Items Visibility Help < >			
Properties Methods Events Comment			
<input checked="" type="checkbox"/>	Bean name	AD1	
<input checked="" type="checkbox"/>	A/D converter	ADC	ADC
<input checked="" type="checkbox"/>	Sharing	Disabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	Interrupt service/event	Enabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	A/D interrupt	INT_ADCA_Complete	INT_ADCA_Complete
<input checked="" type="checkbox"/>	A/D interrupt priority	medium priority	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Interrupt preserve registers	yes	
<input checked="" type="checkbox"/>	Interrupt	INT_ADC_ZC_LE	INT_ADC_ZC_LE
<input checked="" type="checkbox"/>	Interrupt priority	medium priority	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Interrupt preserve registers	yes	
<input checked="" type="checkbox"/>	A/D channels	1	+ -
<input checked="" type="checkbox"/>	Queue	Enabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	Mode	Sequential	
<input checked="" type="checkbox"/>	A/D samples	8	+ -
<input checked="" type="checkbox"/>	Sample0	Enabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	Channel	0	
<input checked="" type="checkbox"/>	High limit	32760	
<input checked="" type="checkbox"/>	Low limit	0	
<input checked="" type="checkbox"/>	Offset	0	
<input checked="" type="checkbox"/>	Zero crossing	Disabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	Sample1	Disabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	Sample2	Disabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	Sample3	Disabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	Sample4	Disabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	Sample5	Disabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	Sample6	Disabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	Sample7	Disabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	A/D prescaler	ADC_ADCR2	ADC_ADCR2
<input checked="" type="checkbox"/>	A/D resolution	12 bits	12 bits
<input checked="" type="checkbox"/>	Conversion time	17 μ s	16.469 μ s
<input checked="" type="checkbox"/>	Trigger configuration wizard	Click to run configurater >	
<input checked="" type="checkbox"/>	Internal trigger	Disabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	Volt. ref. recovery time	100	
<input checked="" type="checkbox"/>	Power up delay	13	
<input checked="" type="checkbox"/>	Power savings mode	Disabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	Auto standby	Disabled	
<input checked="" type="checkbox"/>	Volt. ref. source	controlled by this bean for	
<input checked="" type="checkbox"/>	Number of conversions	255	
<input checked="" type="checkbox"/>	Initialization		

Figura 29: Tela de parametrização do conversor analógico digital.

Para garantir que a taxa de amostragem do sinal de entrada é constante, é utilizado um temporizador. Este temporizador é configurado para gerar uma taxa de amostragem de 100Hz, mas pode ser ajustado dinamicamente dependendo da necessidade da aplicação. A taxa de 100Hz foi adotada levando em consideração a quantidade de memória do DSP e o tempo necessário para uma amostra atravessar os bobinas detectoras. A Figura 30 apresenta a tela de parametrização do temporizador no ambiente de programação do DSP.

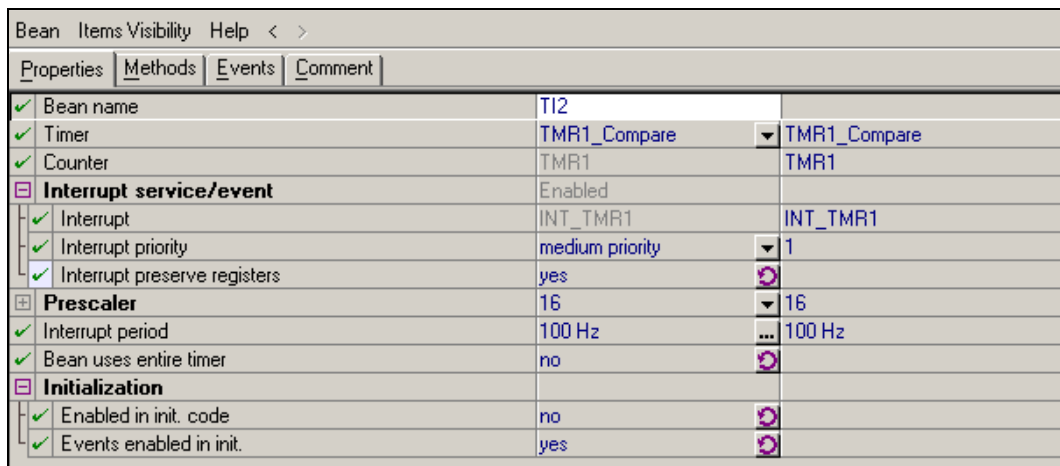


Figura 30: Tela de parametrização do temporizador.

Outras funções importantes do software são realizadas utilizando sinais de entrada e saída digital. Entre elas, está a leitura das teclas, a saída à relé que interliga o detector com o mundo exterior e a conexão com a tela de cristal líquido.

3.4.2 Desenvolvimento do hardware

3.4.2.1 Construção da placa de circuito impresso

A placa de circuito impresso que compõe o detector de metais foi construída de forma artesanal, pois se trata apenas de um protótipo.

Para a confecção da placa foi utilizada uma impressora de plaquetas, que com algumas adaptações, funcionou adequadamente. A Figura 31 mostra a impressora utilizada.

Para que esta impressora funcionasse na confecção de placas de circuito foi necessário substituir a pena padrão por uma caneta permanente. A caneta utilizada é uma caneta para retroprojeter com ponta de 0.5 mm.

Também foi necessário adequar o software de confecção de placas a operar no protocolo HPGL.

A Figura 33 mostra o detalhe da impressora desenhando as trilhas, a caneta permanente.

A placa utilizada é uma placa de fibra de vidro, revestida nas duas faces com cobre. Após o processo de impressão a placa é mergulhada em um ácido e todo o cobre que não é protegido pela tinta da caneta é corroído, resultando assim apenas as trilhas.



Figura 31: Impressora usada para confeccionar a placa.

Na Figura 32 pode-se observar a impressora desenhando as trilhas na placa.

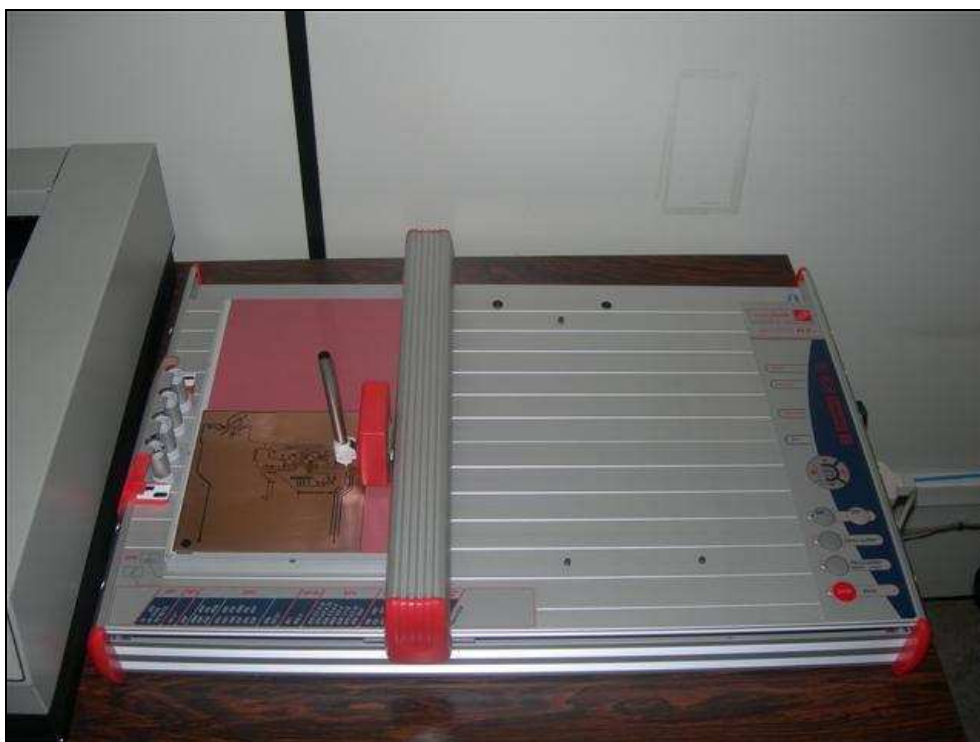


Figura 32: Impressora desenhando as trilhas na placa.

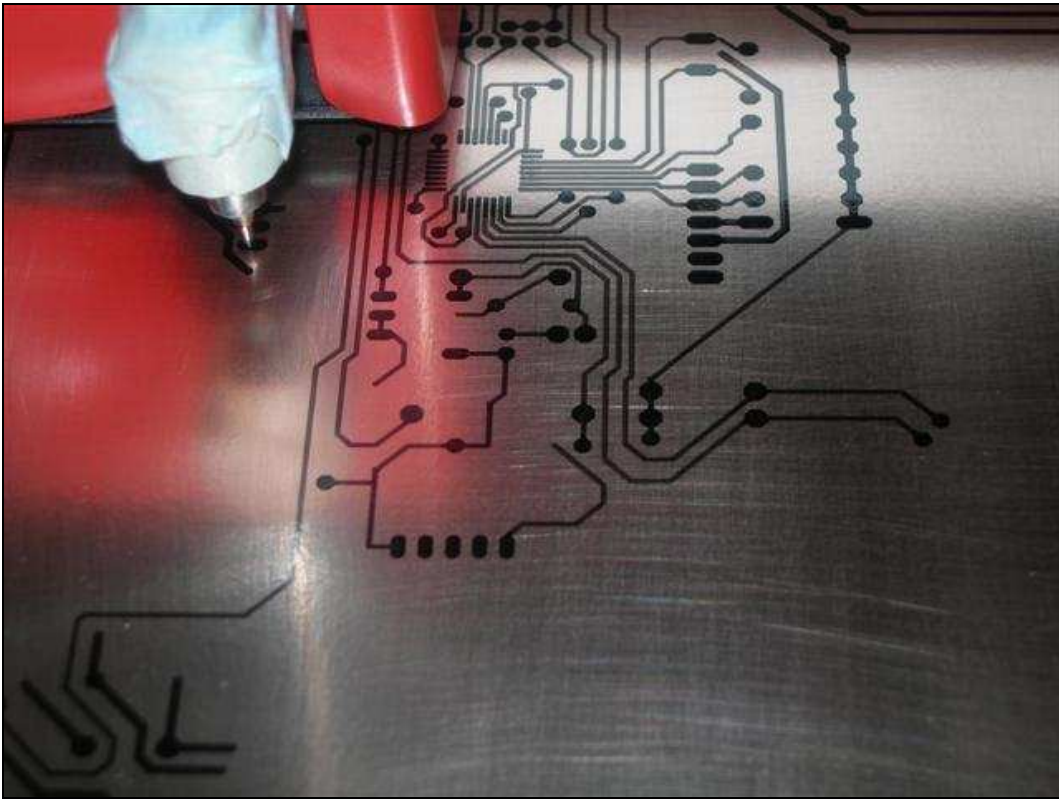


Figura 33: Detalhe do desenho da placa.

O processo para confecção da placa de circuitos é simples. O projeto é feito no software e o desenho das trilhas na placa é feito por uma impressora, como visto anteriormente.

3.4.2.2 O circuito eletrônico

Para construir o protótipo do detector de metais foi construído um circuito complexo composto por vários elementos com funções distintas. O diagrama de blocos da Figura 34 ilustra estes blocos e sua interligação.

Nos próximos parágrafos, serão detalhadas cada uma das partes que compõem o circuito, começando pela fonte de alimentação.

Na construção da fonte, foram levados em conta dois critérios: nível de tensão necessário e potência consumida em cada nível de tensão. A Figura 35 apresenta o circuito da fonte. Esta é uma fonte linear composta por um transformador, retificação, filtragem e regulação.

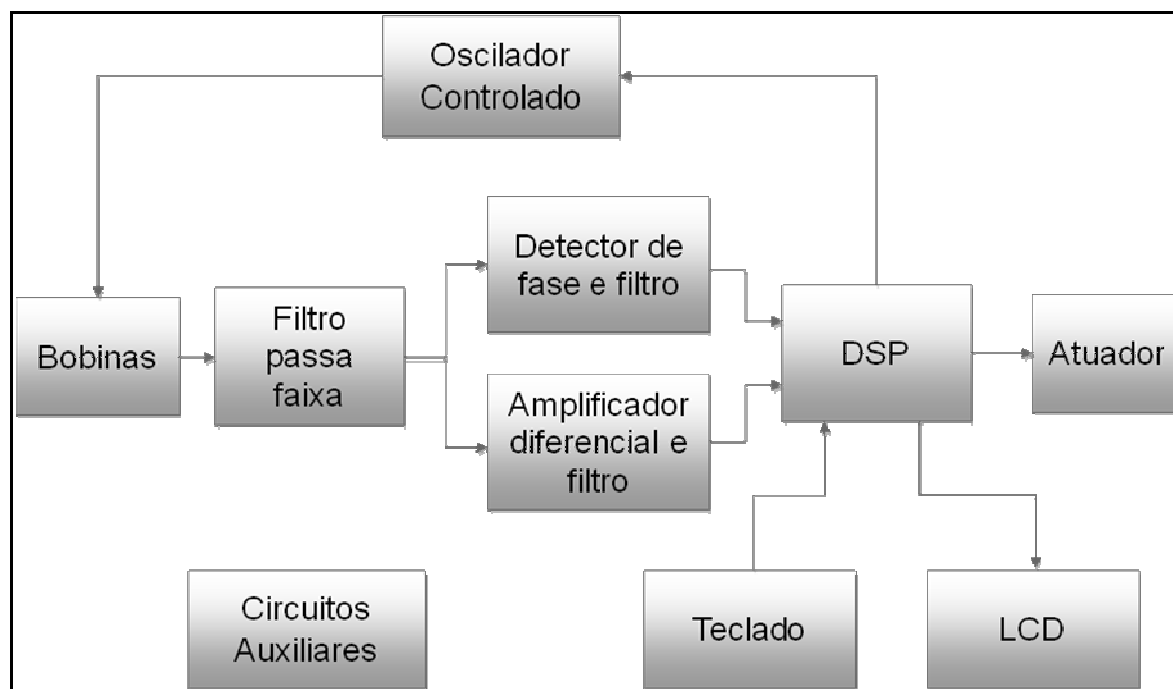


Figura 34: Diagrama de blocos do circuito.

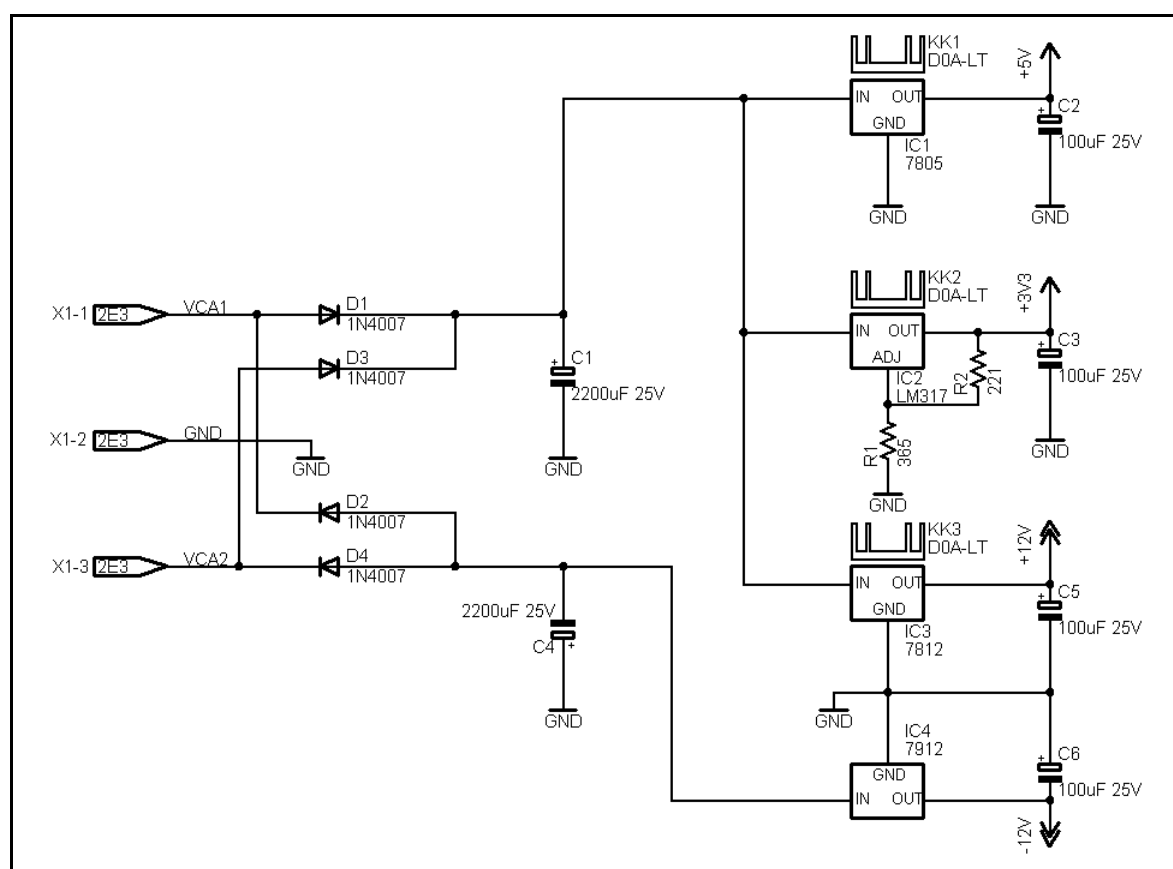


Figura 35: Fonte de alimentação do circuito.

O circuito da fonte recebe energia de um transformador externo, cujas saídas são de 12Vac com ponto médio. A fonte converte esta entrada em corrente contínua e regula para quatro níveis diferentes de tensão. A primeira saída é de 5Vcc e é usada para alimentar a tela de cristal líquido. A segunda saída é de 3,3Vcc e é utilizada para alimentar o DSP. A terceira e quarta saídas operam juntas e fornecem uma tensão simétrica de +12Vcc e -12Vcc. Esta tensão simétrica é utilizada para alimentar o circuito oscilador, que envia o sinal de 10kHz para a bobina transmissora e para alimentar os vários amplificadores operacionais utilizados nas etapas de filtragem e amplificação do sinal.

Outra parte importante do circuito é o oscilador controlado pelo DSP. Este componente é responsável por amplificar e filtrar o sinal de 10kHz gerado pela saída PWM do DSP. A Figura 36 mostra como foi construída esta parte do circuito.

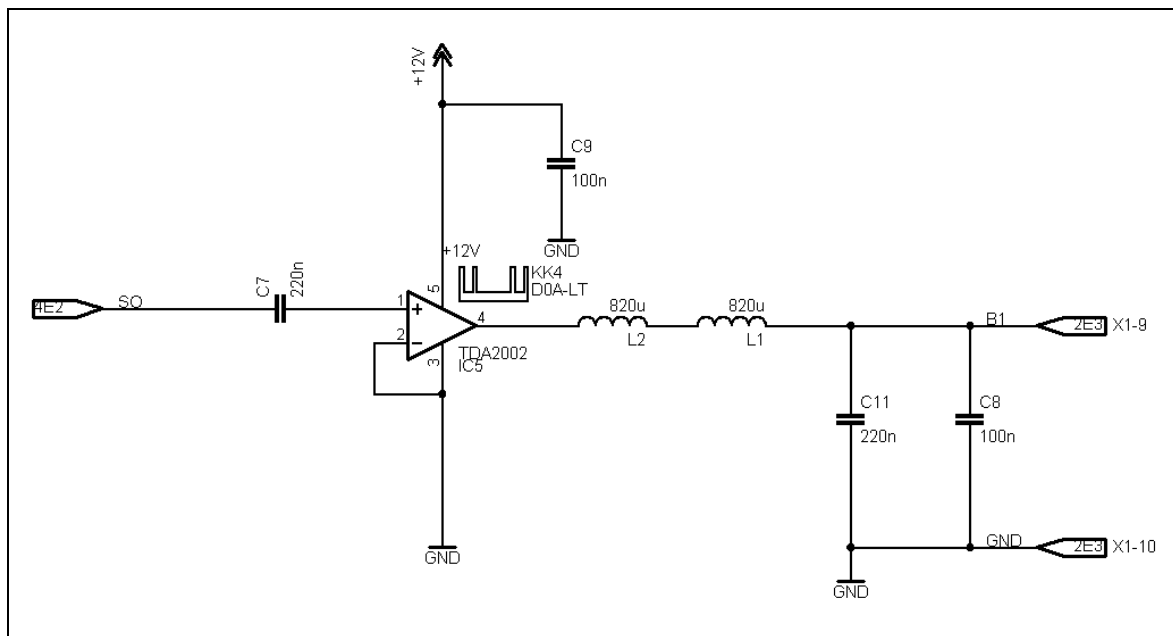


Figura 36: Oscilador controlado.

O funcionamento deste circuito é simples, o TDA2002, que é um amplificador operacional de potência, funciona como comparador amplificando a onda quadrada de 10KHz enviada pelo DSP. Os indutores L1 e L2, em conjunto com os capacitores C11 e C8 e em conjunto com a bobina transmissora, funcionam como filtro. Este filtro transforma o sinal de onda quadrada em onda senoidal.

A parte digital deste circuito é composta pelo DSP e pela tela de cristal líquido, a Figura 37 apresenta este circuito.

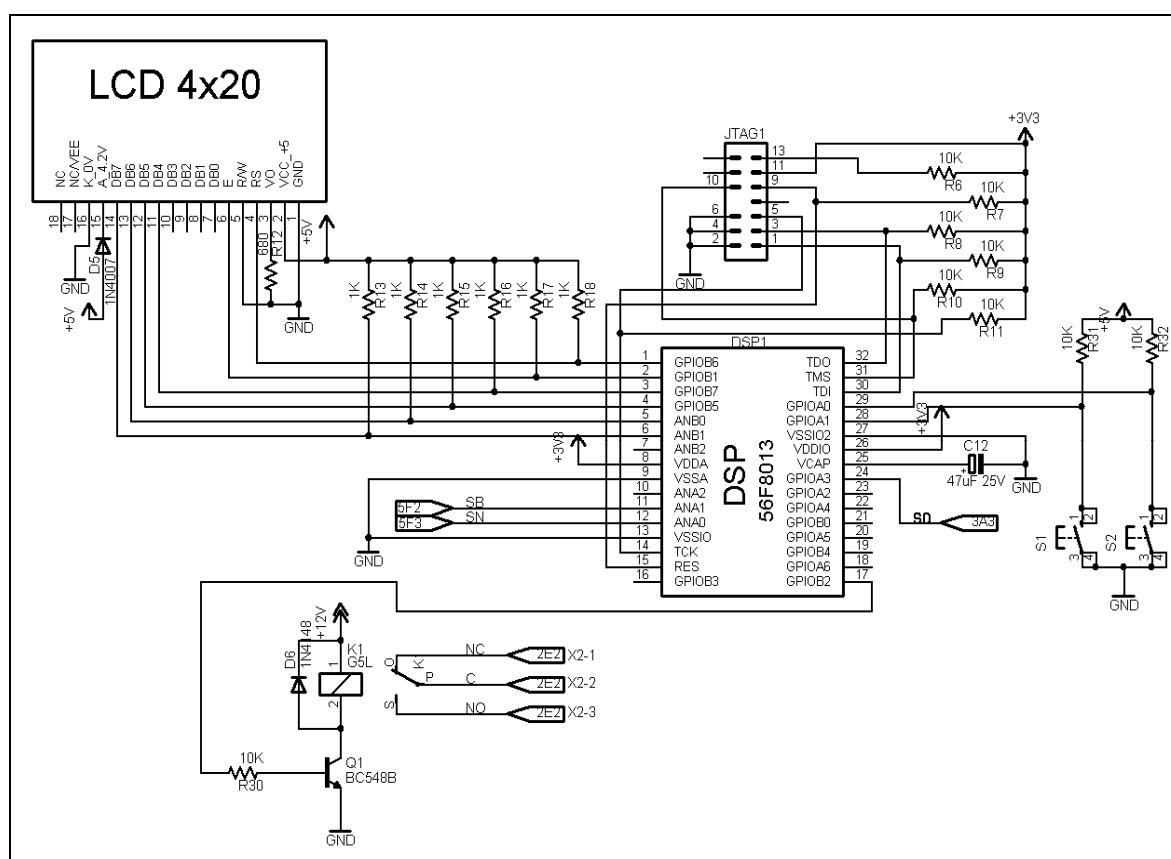


Figura 37: Circuito do DSP.

A tela de cristal líquido utilizada para a construção do protótipo é composta por quatro linhas, cada uma com vinte caracteres. O barramento de comunicação utiliza apenas quatro vias de dados e duas de controle.

Pode-se ver na figura o relé de saída, que é responsável por enviar o sinal de metal detectado para o mundo exterior, pode-se ver também os dois botões de ajuste e o conector de programação do DSP.

O principal componente deste circuito é sem dúvida o DSP, que recebe o sinal do circuito analógico, processa e envia os resultados às saídas apropriadas.

No circuito, é possível notar que este DSP utiliza poucos componentes externos. Este foi um dos motivos pelo qual este componente foi escolhido, o único componente externo é um capacitor de 47µF que serve para estabilizar a tensão do núcleo do DSP, que é de 2,5V.

Os elementos do circuito que mais exigiram atenção foram os filtros analógicos. A Figura 38 mostra o conjunto total dos filtros e amplificadores utilizados para tratar o sinal das bobinas. Cada um dos elementos desta parte do circuito será descrito na seqüência deste trabalho.

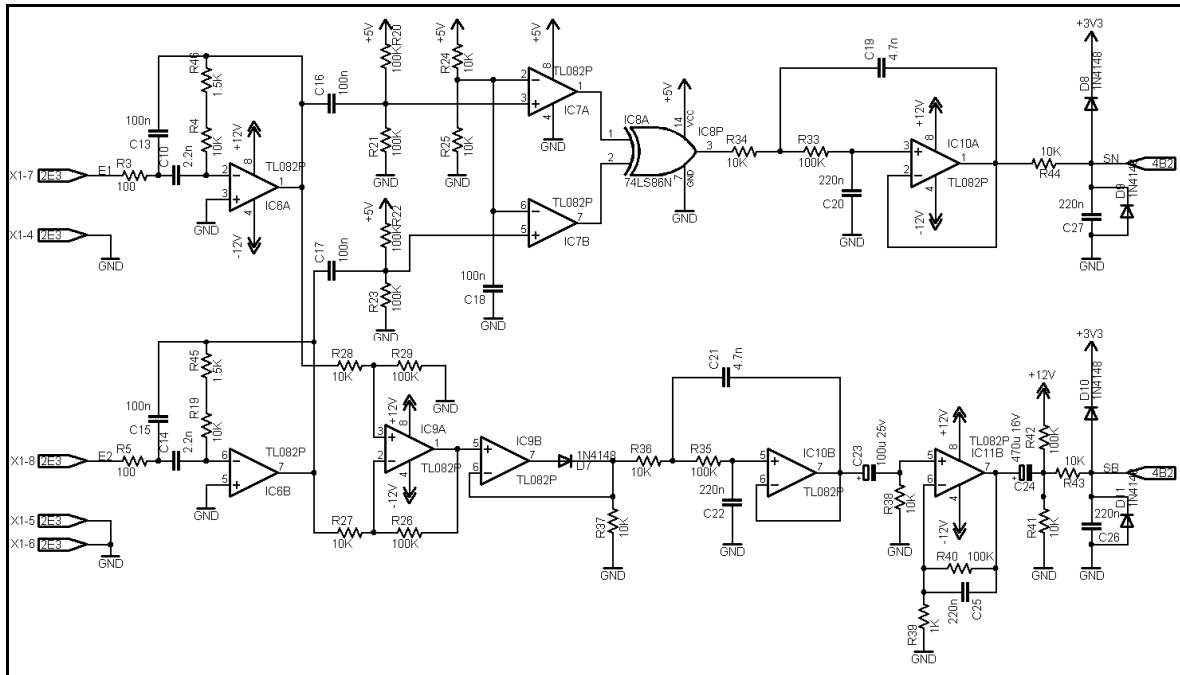


Figura 38: Filtros e amplificadores.

A primeira filtragem, que é aplicada aos dois sinais que chegam das bobinas receptoras, é feita por um filtro passa-faixa com frequência central em 10KHz. A principal dificuldade na construção destes filtros foi encontrar uma combinação de valores comerciais de resistores e capacitores que mantivesse a frequência central do filtro na frequência desejada. Este filtro serve para eliminar interferências recebidas do meio ambiente, levando em conta que o ambiente industrial é muito ruidoso. A Figura 39 mostra o circuito deste filtro.

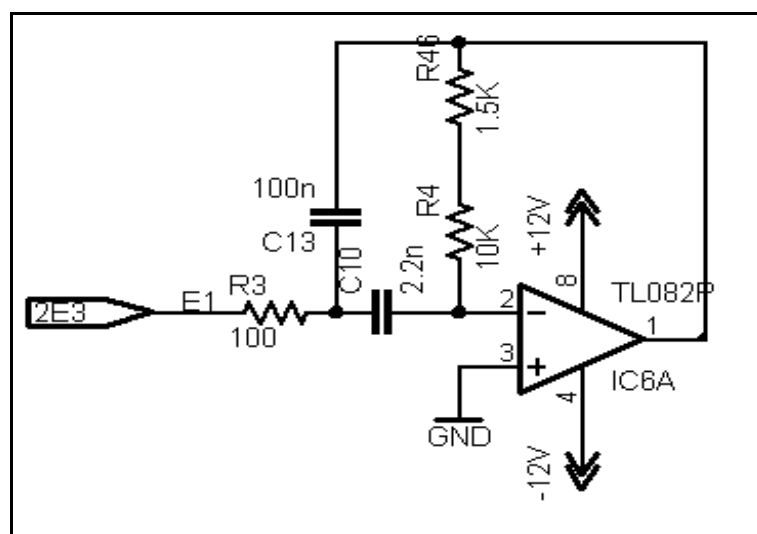


Figura 39: Detalhe do circuito do filtro passa-faixa.

Segundo (PAARMANN 2001), a Equação 13 apresenta a função de transferência para a topologia adotada neste filtro.

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{ks}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (13)$$

Onde, os valores das constantes são dados pela Equação 14, bastando apenas definir o valor dos componentes.

$$k = \frac{-1}{R_1 C_2}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (14)$$

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{(C_1 + C_2)}{R_2 C_1 C_2}$$

A nomenclatura dos componentes pode ser observada na Figura 40.

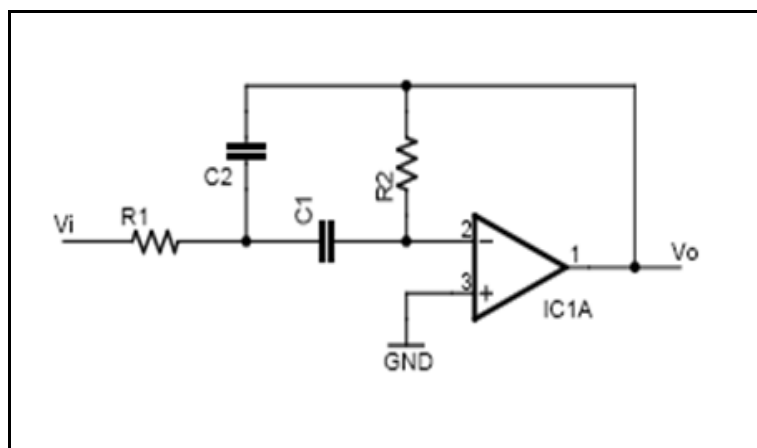


Figura 40: Nomenclatura dos componentes no filtro.

Os valores adotados no protótipo para estes componentes estão na Equação 15.

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 100\Omega \\
 R_2 &= 11,5K\Omega \\
 C_1 &= 2,2nF \\
 C_2 &= 100nF
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Substituindo a Equação 15 na Equação 14, e na seqüência, substituindo a Equação 14 na Equação 13, a função de transferência obtida para este filtro é a da Equação 16.

$$H(s) = \frac{-1 \cdot 10^5 s}{s^2 + 4,039 \cdot 10^4 s + 3,952 \cdot 10^9}
 \tag{16}$$

O comportamento esperado pode ser visto nas figuras a seguir. A Figura 41 apresenta a resposta em frequência em radianos por segundo e a Figura 42 apresenta a fase para esta resposta em frequência em graus por radianos por segundo.

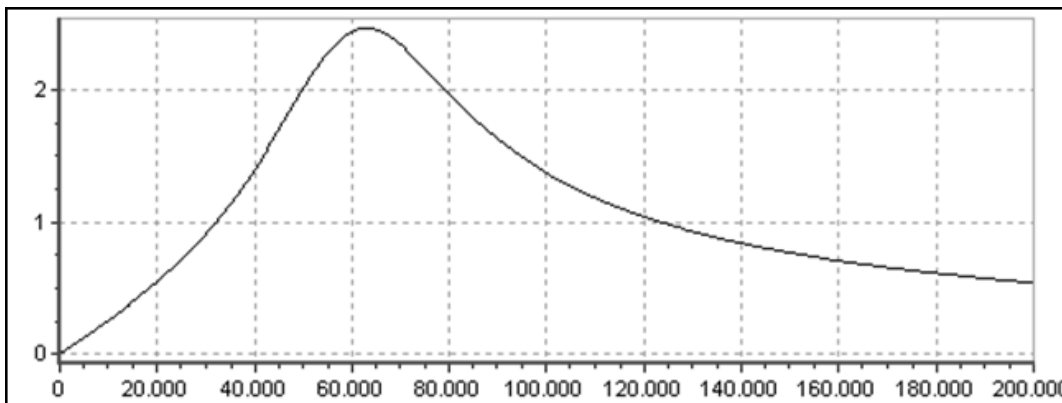


Figura 41: Resposta em frequência do filtro passa faixa.

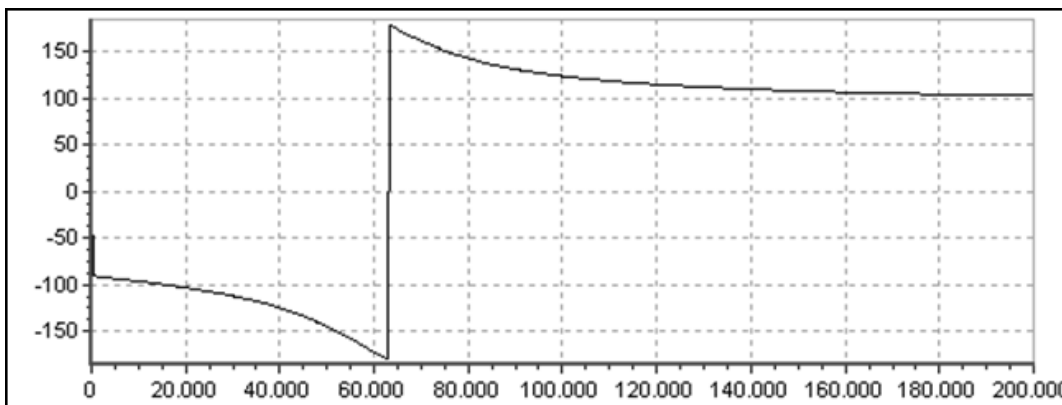


Figura 42: Fase do filtro passa faixa.

É importante lembrar que os gráficos anteriores foram gerados pelo software FT3D e a escala de frequência está em radianos por segundo, assim, o centro da banda passante do filtro que é em 10kHz equivale a 62831 radianos por segundo. A Figura 43 ilustra a posição relativa dos pólos, que são:

Pólos:
 $-20195 + j59532,865$
 $-20195 - j59532,865$

Zeros:
 0
 Infinito

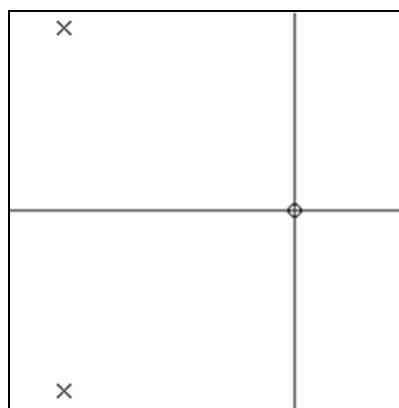


Figura 43: Pólos e zeros.

Os sinais depois de filtrados são então aplicados a dois circuitos diferentes. O primeiro é um amplificador diferencial, Figura 44, que serve para amplificar a diferença de tensão entre os sinais das duas bobinas receptoras. O segundo, Figura 45, é um detector de fase que serve para amplificar apenas a diferença de fase entre os sinais das duas bobinas receptoras.

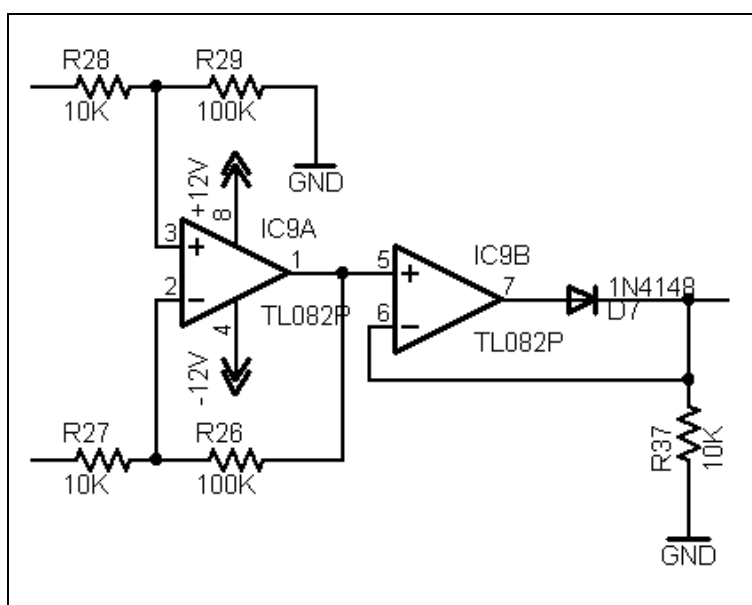


Figura 44: Amplificador diferencial.

O amplificador diferencial amplifica apenas a diferença de tensão entre as duas entradas, ignorando a tensão de modo comum. A este amplificador foi adicionado um circuito que se comporta como um diodo ideal a fim de remover a parte negativa do sinal.

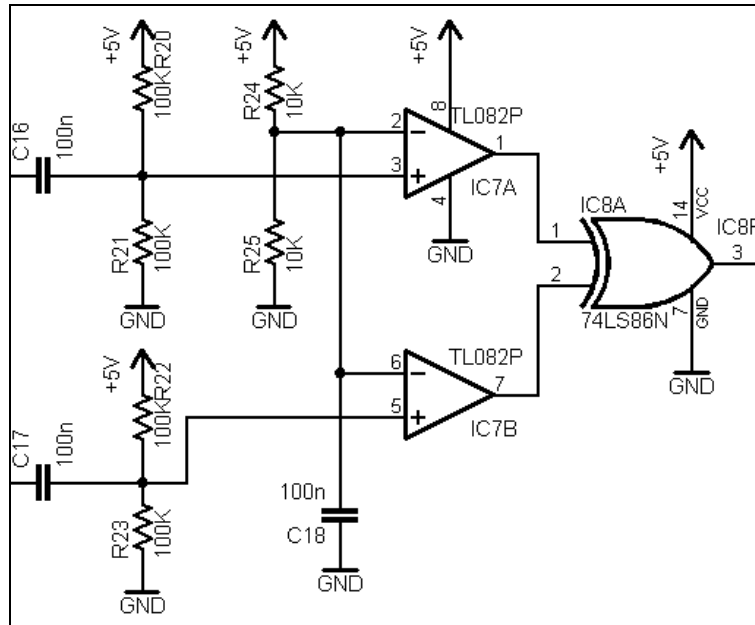


Figura 45: Circuito detector de fase

Este circuito detector de fase fornece em sua saída uma forma de onda quadrada, cuja razão cíclica é proporcional à defasagem entre os sinais de entrada.

Tanto a saída do amplificador diferencial como a saída do detector de fase ainda possuem componentes de alta frequência oriundos do sinal de 10kHz, o que dificulta a digitalização do sinal. Para eliminar esta porção do sinal de alta frequência foi projetado um filtro passa baixas cujo circuito pode ser observado na Figura 46.

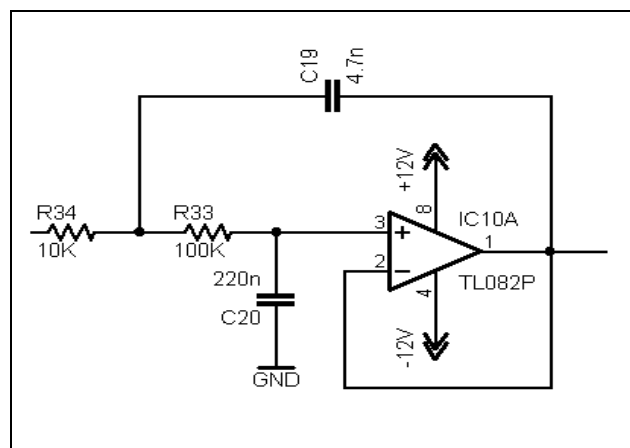


Figura 46: Filtro passa baixas.

A Equação 17 apresenta a função de transferência para a topologia adotada neste filtro.

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{k\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (17)$$

Onde os valores das constantes são dados pela Equação 18.

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$$

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} - \frac{k}{R_2 C_1} \quad (18)$$

$$k = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$

A nomenclatura dos componentes pode ser observada na Figura 47.

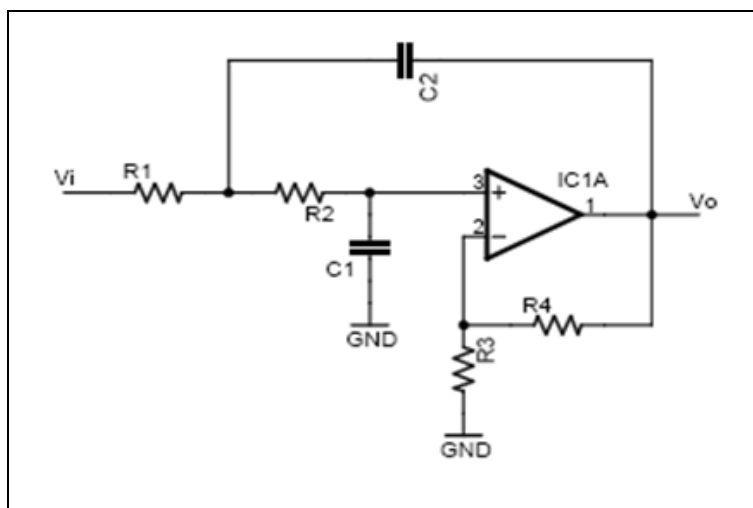


Figura 47: Nomenclatura dos componentes nesta topologia.

Os valores adotados no protótipo para estes componentes estão na Equação 19.

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 10K\Omega \\
 R_2 &= 100K\Omega \\
 C_1 &= 220nF \\
 C_2 &= 470nF \\
 k &= 1
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Substituindo a Equação 19 na Equação 18 e, na seqüência, substituindo a Equação 18 na Equação 17, a função de transferência obtida para este filtro é a da Equação 20.

$$H(s) = \frac{9671,18}{s^2 + 234,04s + 9671,18}
 \tag{20}$$

O comportamento esperado pode ser visto nas figuras a seguir. A Figura 48 apresenta a resposta em frequência em dB por radianos por segundo e a Figura 49 apresenta a fase para esta função de transferência em graus por radianos por segundo.

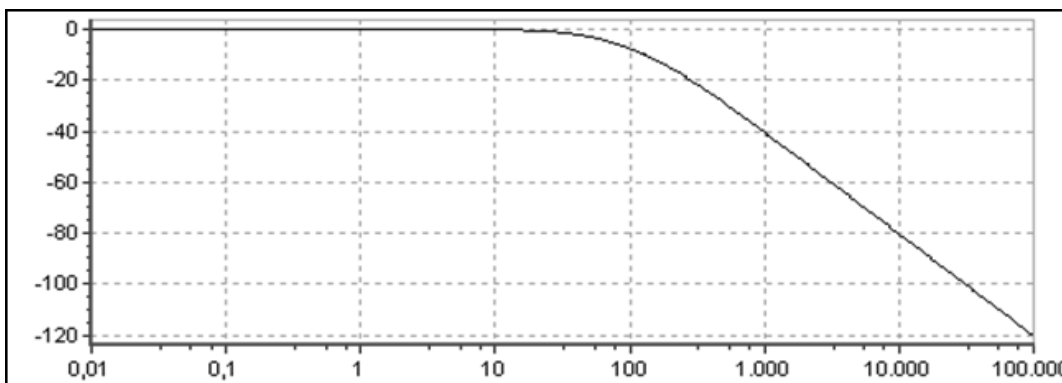


Figura 48: Resposta em frequência do filtro passa baixas.

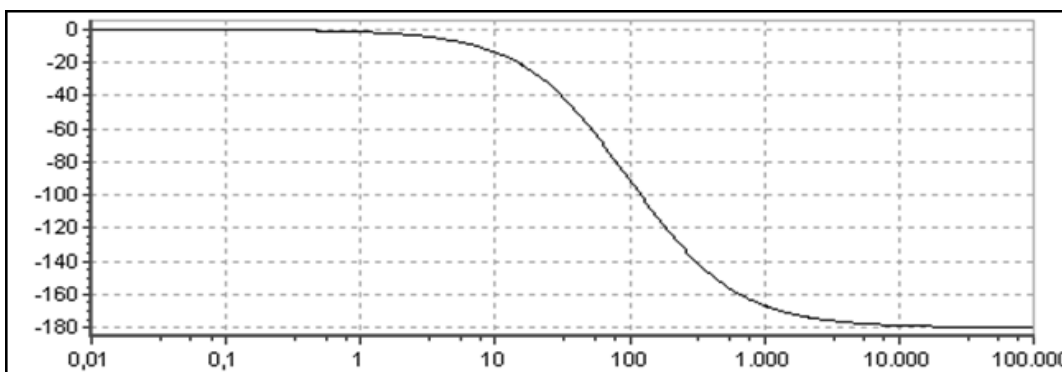


Figura 49: Fase do filtro passa baixas.

É importante lembrar que os gráficos anteriores foram gerados pelo software FT3D e a escala de frequência esta em radianos por segundo. A Figura 50 ilustra a posição relativa dos pólos, que são:

Pólos:
-53,596
-180,447

Zeros:
Infinito
Infinito

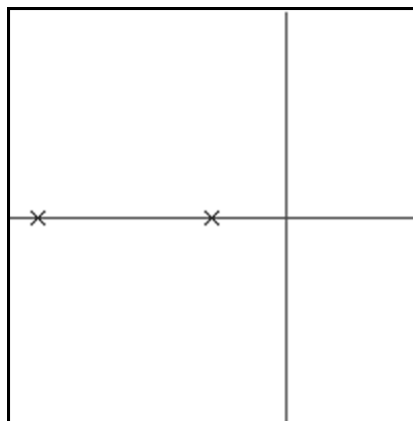


Figura 50: Pólos e zeros.

A última etapa do circuito analógico é um amplificador que além de amplificar o sinal também adéqua e limita este sinal para não danificar a entrada do conversor analógico digital. Esta etapa é necessária, pois a entrada do conversor analógico digital só pode receber um sinal entre 0 e 3.3V e alem disso é necessário deslocar o zero do sinal para o meio desta faixa de operação. A Figura 51 apresenta este circuito.

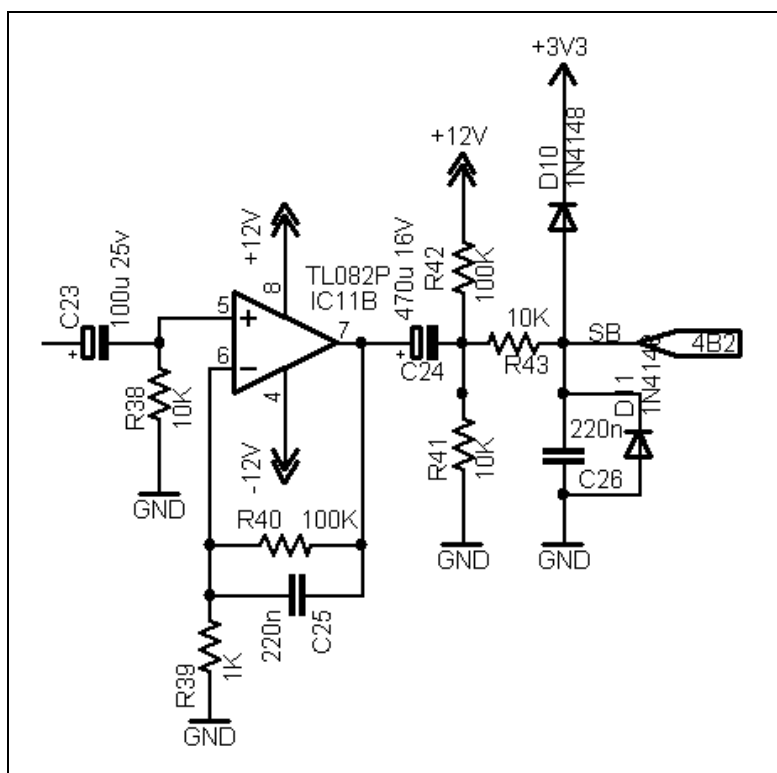


Figura 51: Amplificador e limitador.

Este circuito amplificador é aplicado apenas ao sinal de amplitude, uma vez que o sinal de fase já tem uma amplitude aceitável.

3.4.2.3 Conjunto de bobinas

O último componente de hardware envolvido na detecção de metais e que foi construído para compor o protótipo foi o conjunto de bobinas.

Este conjunto é composto por uma bobina transmissora e duas bobinas receptoras com metade da área da transmissora. Foram construídos vários modelos com formatos e materiais diferentes, as principais diferenças estão na maneira de compor as bobinas.

Tradicionalmente utiliza-se em detectores de metais, bobinas construídas com fio de cobre esmaltado. Este fio é enrolado em um material não metálico e em seguida fundido em um tipo de resina para evitar deformações e aumentar a resistência mecânica. Este processo acaba ficando caro, pois normalmente as bobinas são enroladas a mão e a resina usada tem um custo elevado.

Outra desvantagem deste é a dificuldade em fazer com que todas as bobinas tenham as mesmas características, pois sempre pode haver pequenas variações na montagem.

A alternativa encontrada para diminuir o custo e melhorar a qualidade das bobinas foi construí-las em circuito impresso. Utilizou-se uma placa de dupla face, numa face foi desenhada a bobina transmissora e na outra, as duas bobinas receptoras. A Figura 52 mostra o conjunto de bobina resultante.

O custo de produção deste tipo de bobina é menor, pois basta aos fabricantes de placas de circuito impresso programar as máquinas e produzir os fotolitos. O processo de produção é automatizado, o que garante que todas saiam iguais e com baixo custo de produção.

Outro fator importante na confecção das bobinas detectoras é a resistência mecânica, mas como as bobinas construídas a partir de placas de circuito impresso são extremamente finas, é muito fácil revesti-las com resina, o que as tornam resistentes. O fato de ser mais fina também facilita o processo de instalação, pois o espaço utilizado sob a esteira transportadora do produto é muito menor. Cada bobina foi constituída por 62 espiras.



Figura 52: Conjunto de bobinas construído em circuito impresso.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS

Os resultados foram encontrados de diversas formas, alguns através de simulações, outros através de análises dos dados colhidos do protótipo.

As simulações foram feitas de forma a testar cada parte do circuito analógico separadamente. Também foi simulado o algoritmo do filtro casado, de forma a avaliar suas características dentro e fora do DSP

4.1 RESULTADOS OBTIDOS COM O ALGORITMO DO FILTRO CASADO

Inicialmente serão analisados os resultados das simulações do algoritmo do filtro casado realizadas no Matlab.

Para efetuar estas simulações, foram usados dois sinais, um é o sinal característico da passagem de um metal pelas bobinas detectoras e o outro é um sinal composto por um conjunto de retas que se aproxima do sinal que se deseja detectar. A Figura 53 apresenta o sinal característico.

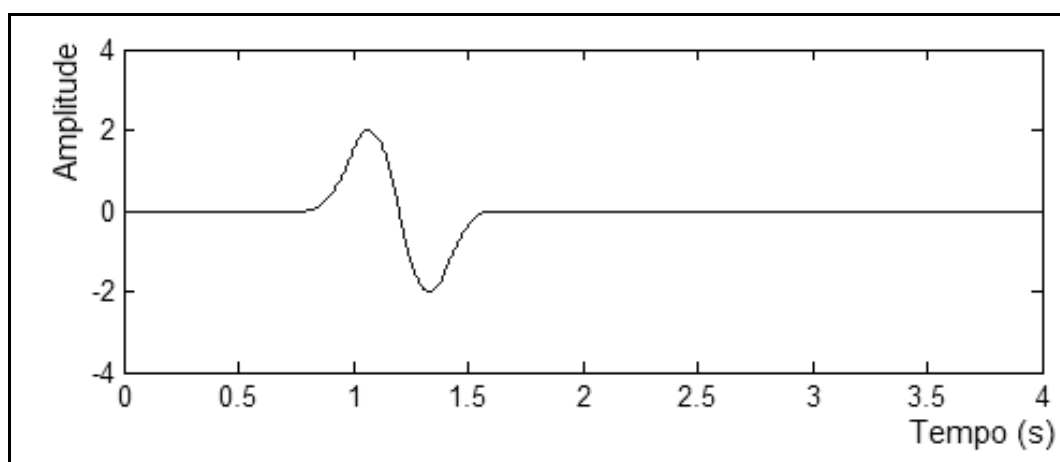


Figura 53: Sinal característico de um detector de metais.

A Figura 54 apresenta a forma de onda aproximada por retas.

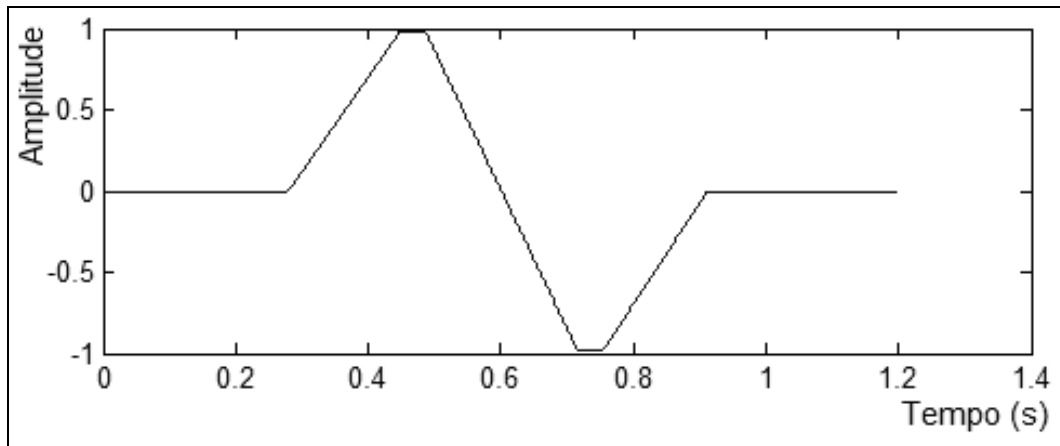


Figura 54: Forma de onda aproximada por retas.

Para verificar a eficiência dos filtros casados foram adicionados diferentes níveis de ruído ao sinal característico. A simulação consistiu em aplicar o filtro casado a cada um dos sinais ruidosos, verificando se na saída ainda será visível o momento em que o metal passa pelas bobinas. A Figura 55 apresenta a primeira combinação de sinal ruidoso e sua saída no filtro.

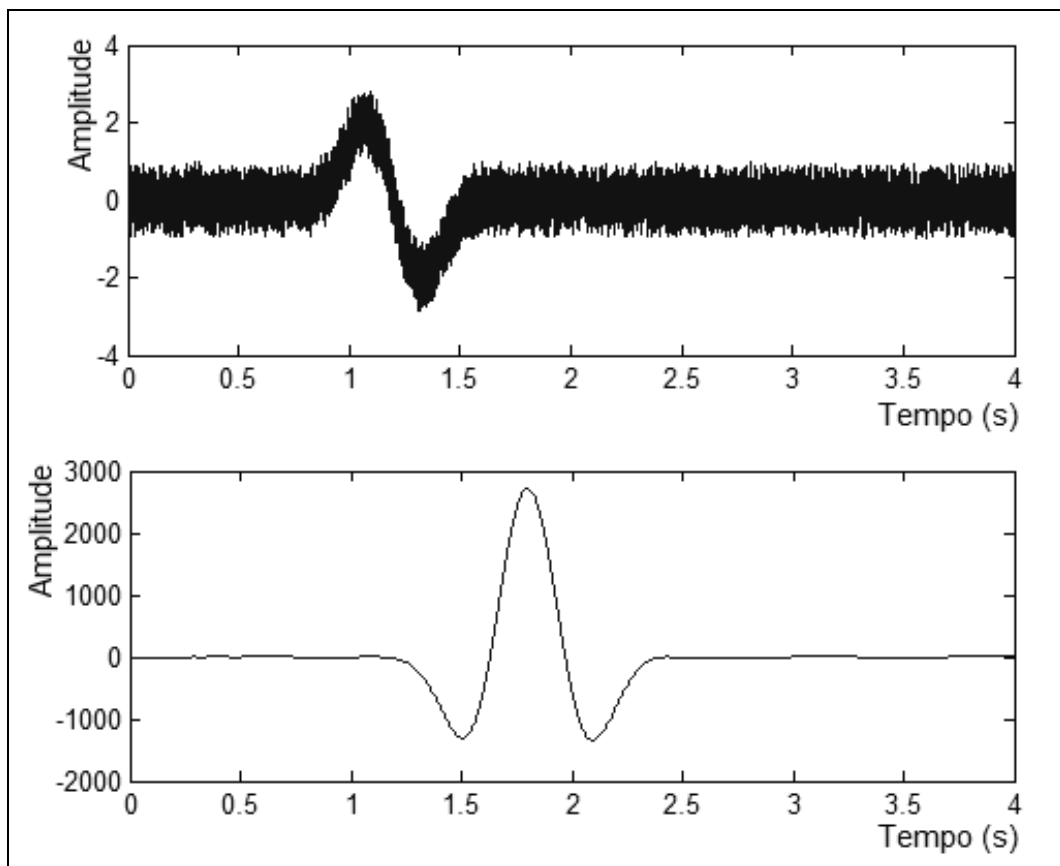


Figura 55: Primeiro sinal ruidoso e a sua saída no filtro.

O ruído adicionado ao sinal é branco, com média igual a zero e com amplitude de duas unidades de pico a pico, e o sinal a ser simulado tem uma amplitude de quatro unidades de pico a pico.

Para a próxima simulação, o nível do ruído foi aumentado para oito unidades de pico a pico. A Figura 56 apresenta o resultado desta filtragem.

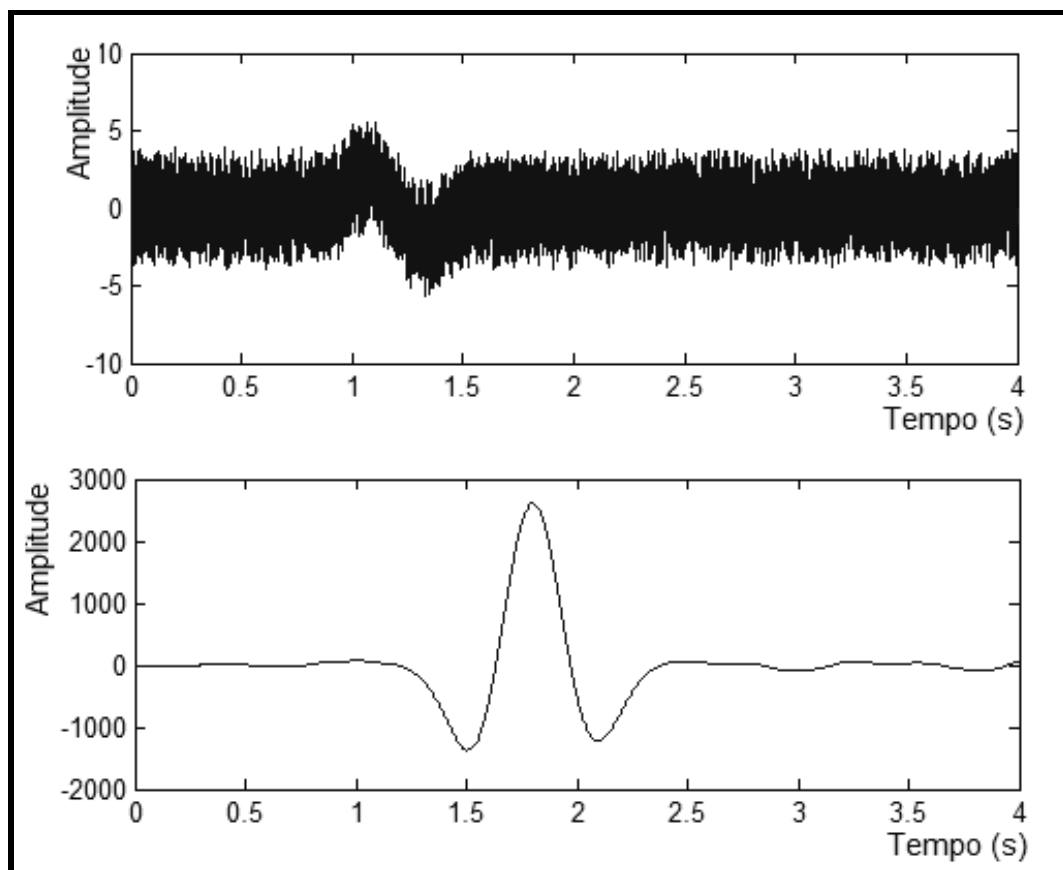


Figura 56: Segundo sinal ruidoso e a sua saída no filtro.

Assim, como na primeira simulação, a saída apresenta um pico característico exatamente no momento em que o metal termina de atravessar as bobinas do detector, mesmo com o aumento do nível de ruído no sinal, este pico característico continua visível.

Em uma terceira simulação, o ruído foi aumentado para sessenta unidades de pico a pico. Com este nível de ruído já fica impossível identificar visivelmente no sinal de entrada o momento em que a amostra atravessa as bobinas receptoras. A Figura 57 apresenta o resultado desta simulação.

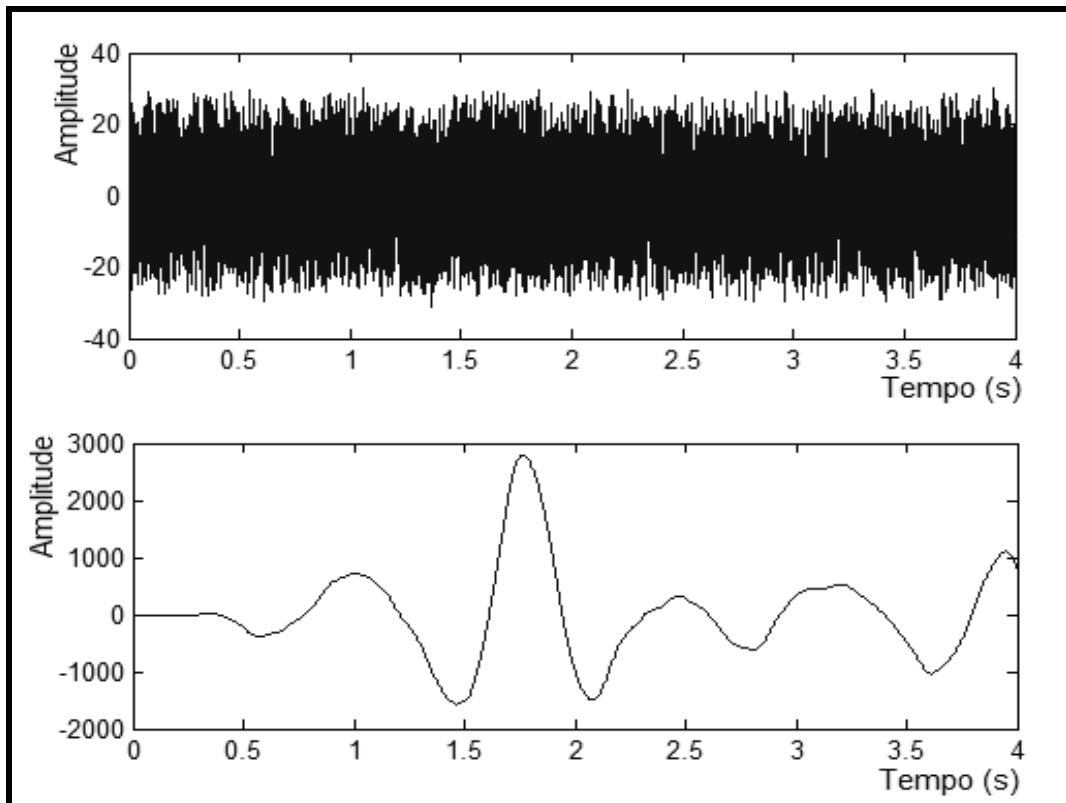


Figura 57: Terceiro sinal ruidoso e a sua saída no filtro.

Observando a ultima saída ainda é possível identificar o momento em que o metal atravessa as bobinas detectoras. Apenas como comparação, foi realizada uma outra simulação onde este último sinal ruidoso foi aplicado em um filtro passa baixas FIR de ordem 100, o resultado pode ser visto na Figura 58. Esta simulação foi realizada com um filtro passa baixas pois este é o método normalmente utilizado nos detectores de metais.

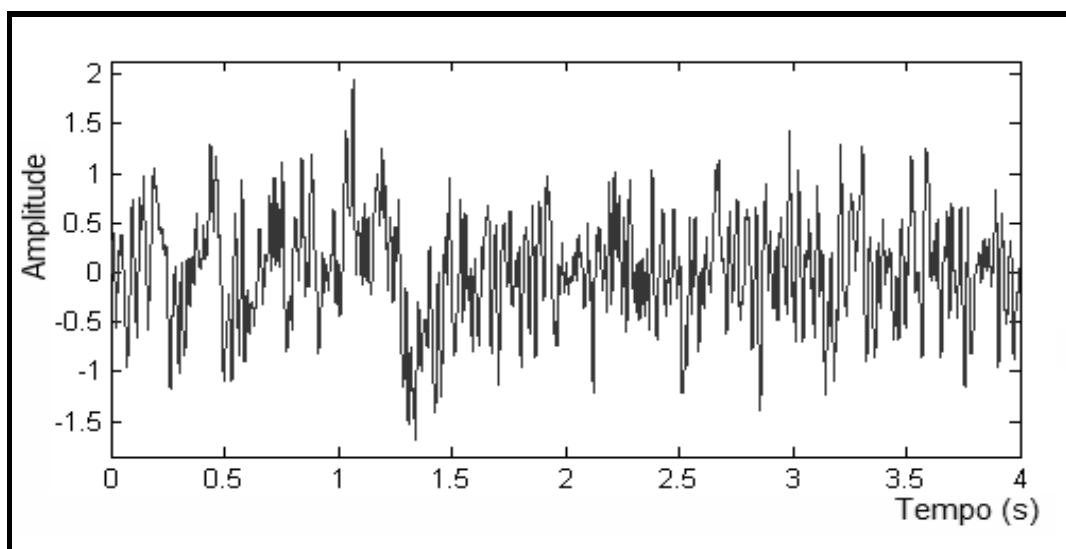


Figura 58: Saída do filtro passa baixas.

Observando a saída do filtro FIR, nota-se que é muito mais difícil identificar o momento em que o metal atravessa as bobinas detectoras.

4.2 RESULTADOS OBTIDOS COM O FILTRO PASSA FAIXA

Outras simulações importantes que foram realizadas foram as simulações dos circuitos analógicos. O software utilizado para simular estes filtros foi o SPICE. O primeiro circuito a ser simulado foi o filtro passa faixa, com banda passante em 10kHz. O resultado desta simulação pode ser visto na Figura 59.

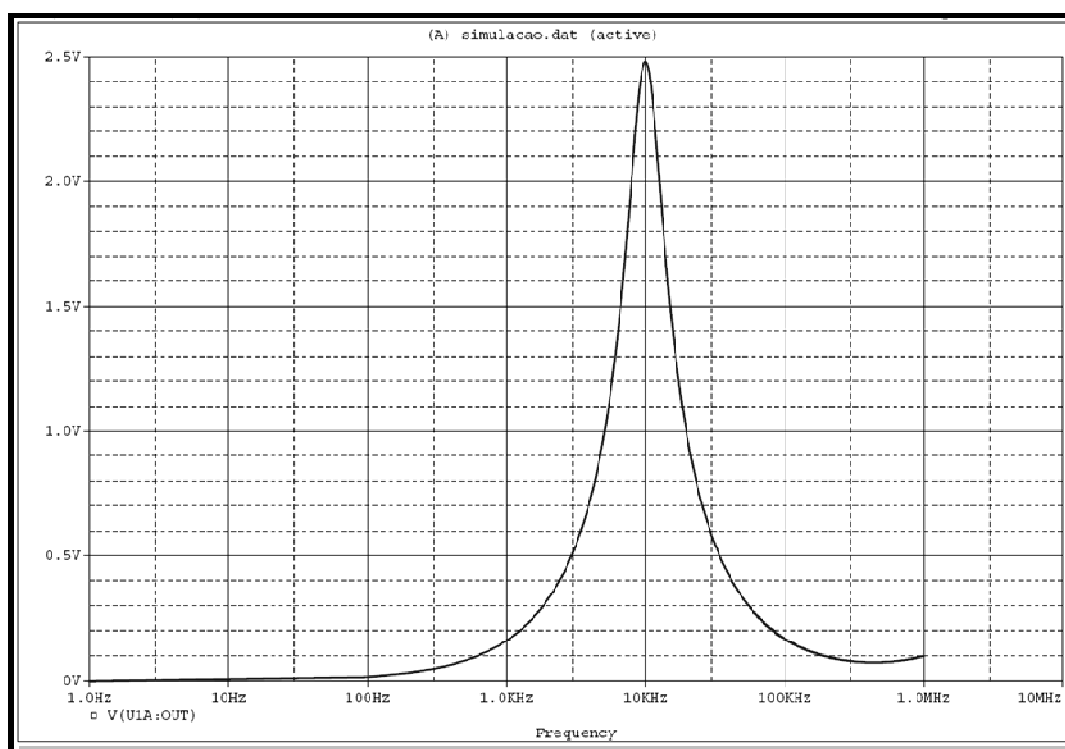


Figura 59: Simulação do filtro passa faixa.

4.3 RESULTADOS OBTIDOS COM O FILTRO PASSA BAIXAS

Outro circuito simulado foi o filtro passa baixas, a Figura 60 mostra o resultado desta simulação.

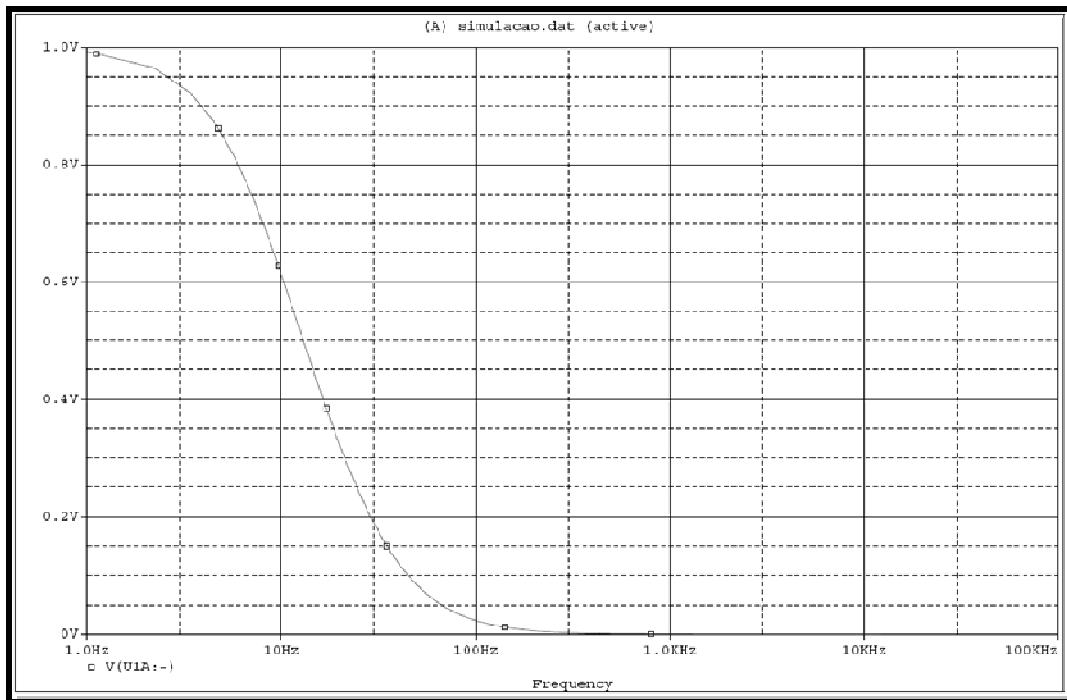


Figura 60: Resultado da simulação do filtro passa baixas.

4.4 RESULTADOS OBTIDOS COM O DETECTOR DE FASE

O circuito do detector de fase também foi simulado. Para esta simulação, foram gerados dois sinais senoidais com um volt de pico, defasados de dez microssegundos. A Figura 61 apresenta estas formas de onda.

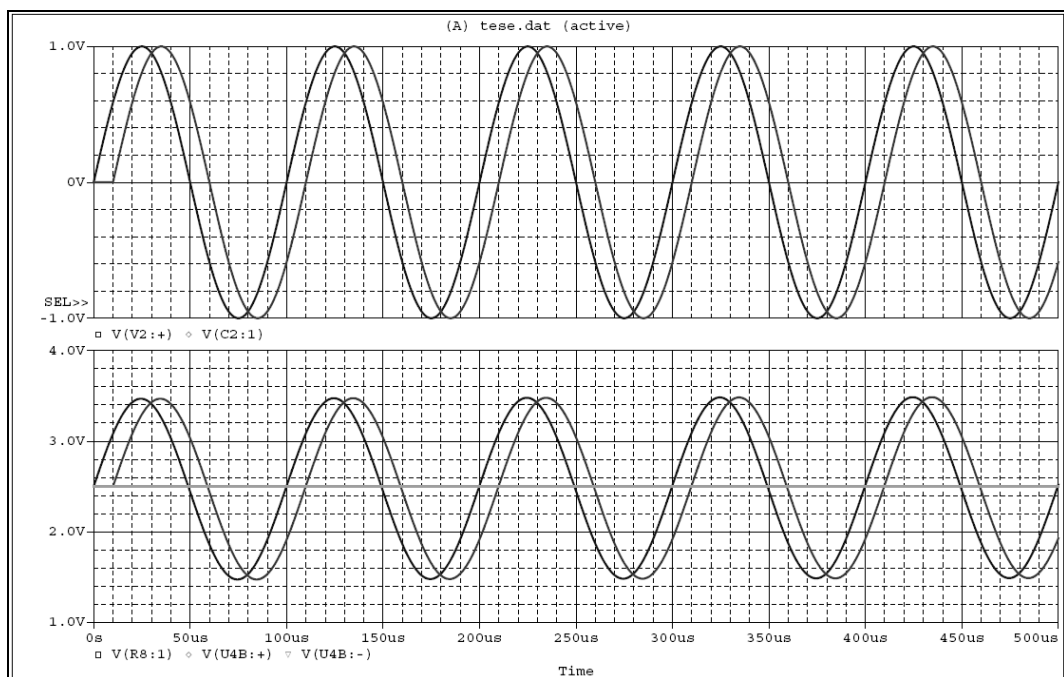


Figura 61: Sinais usados na simulação do detector de fase.

Na primeira etapa deste circuito, estes sinais são deslocados de forma a não restar sinal negativo. O resultado deste deslocamento pode ser visto na segunda forma de onda da Figura 61. Após esta etapa, os dois sinais são enviados a dois comparadores e o resultado na saída dos comparadores pode ser observado na primeira forma de onda da Figura 62.

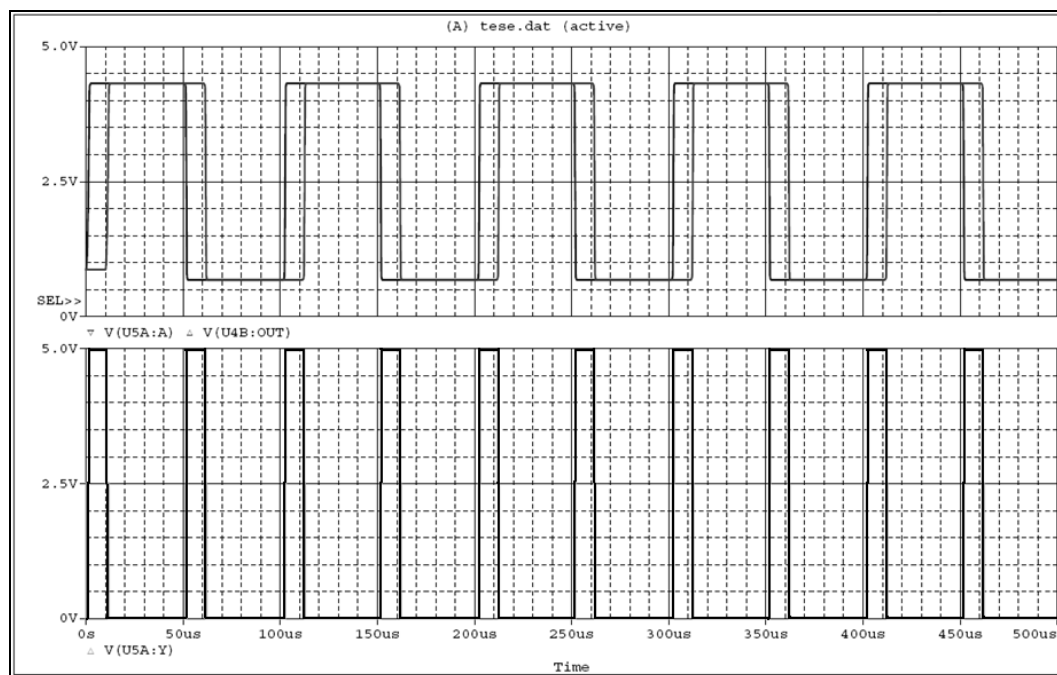


Figura 62: Formas de onda na saída do detector de fase.

Os sinais das saídas dos comparadores são então aplicados a uma porta “ou exclusiva”, onde o resultado é uma onda quadrada com razão cíclica proporcional ao defasamento dos dois sinais de entrada. Esta saída pode ser observada na segunda forma de onda da Figura 62.

4.5 RESULTADOS OBTIDOS COM O AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

O último circuito analógico a ser simulado foi o amplificador diferencial, este circuito é responsável por amplificar a diferença de tensão entre os dois sinais que chegam das bobinas. Para este circuito foram feitas duas simulações distintas.

4.5.1 Amplificador diferencial amplificando diferença de amplitude

Na primeira, foram aplicadas em suas entradas duas senoides de 100 mV e 110 mV de pico respectivamente, estes sinais podem ser observados na primeira forma de onda da Figura 63. Este circuito é de vital importância no funcionamento do detector de metais, pois a sensibilidade do equipamento está relacionada com o nível do sinal na entrada do filtro casado. Contudo, se o sinal for muito amplificado, as saturações envolvidas e o ruído adicionado ao sinal inviabilizam o funcionamento.

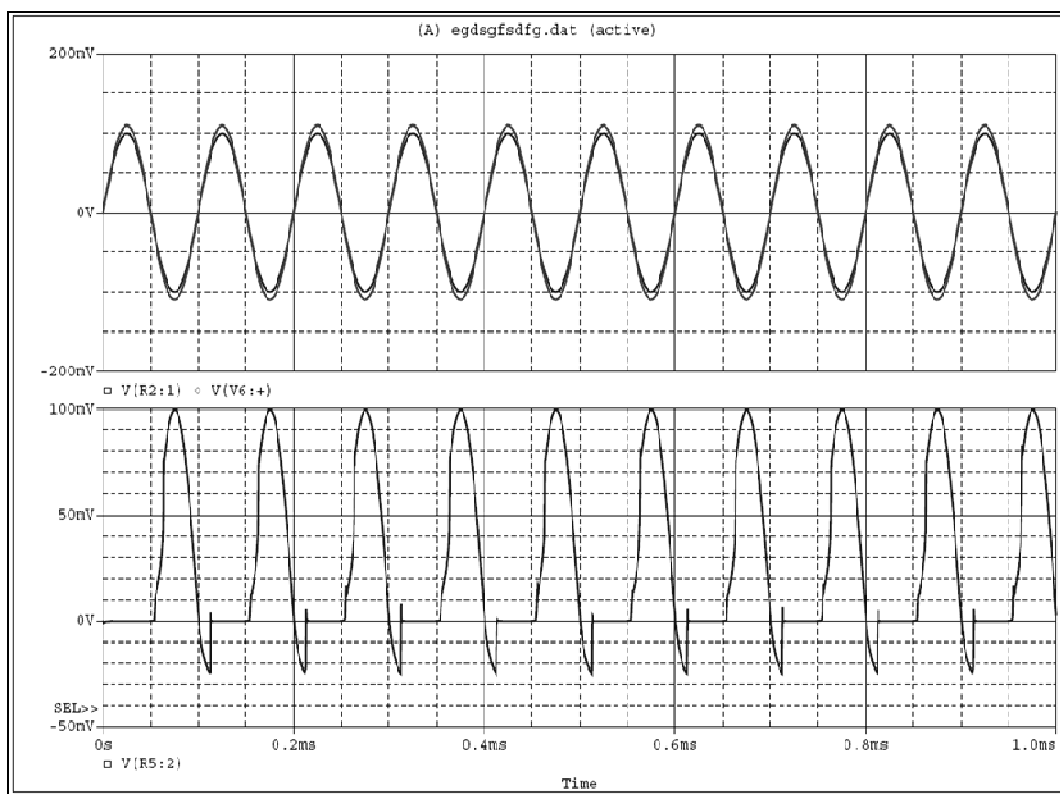


Figura 63: Sinais na entrada e na saída do amplificador diferencial.

Como o ganho deste amplificador é dez, o resultado deve ser dez vezes a diferença de tensão entre os dois sinais de entrada. A segunda forma de onda da Figura 63 comprova o funcionamento deste circuito.

4.5.2 Amplificador diferencial amplificando diferença de fase

Na segunda simulação foram aplicadas nas entradas do circuito duas senoides com 100 mV de pico, mas defasadas no tempo. A primeira forma de onda da Figura 64 apresenta este sinal.

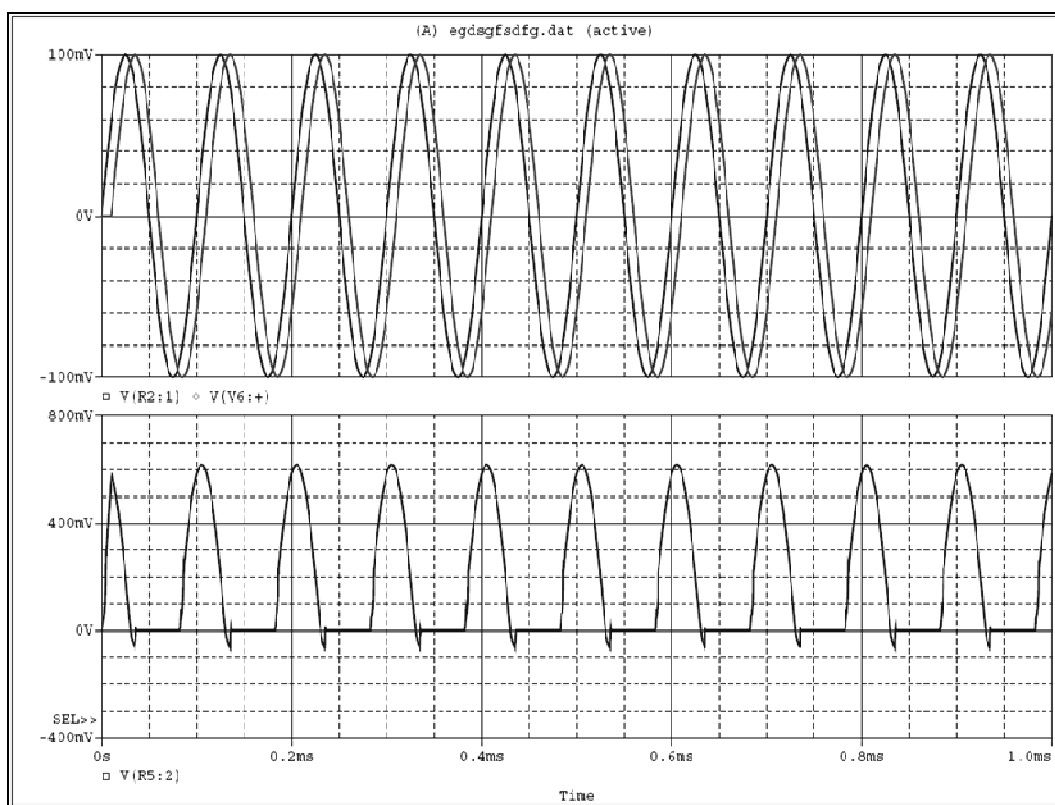


Figura 64: Formas de onda do detector de fase com sinal defasado.

Como era esperado, o circuito amplificou a diferença instantânea de tensão, resultado que pode ser observado na segunda forma de onda da Figura 64. É possível observar que nas duas simulações, o sinal de saída apresenta apenas a parte positiva do sinal, isto se deve a um circuito retificador instalado na saída do amplificador diferencial. Este circuito retificador serve para adequar o sinal para a próxima etapa do circuito. Assim sendo os resultados estão dentro do esperado.

4.6 RESULTADOS OBTIDOS NO PROTÓTIPO

Após a construção do protótipo, da Figura 65, foram realizados vários ensaios, e os resultados são demonstrados a seguir.

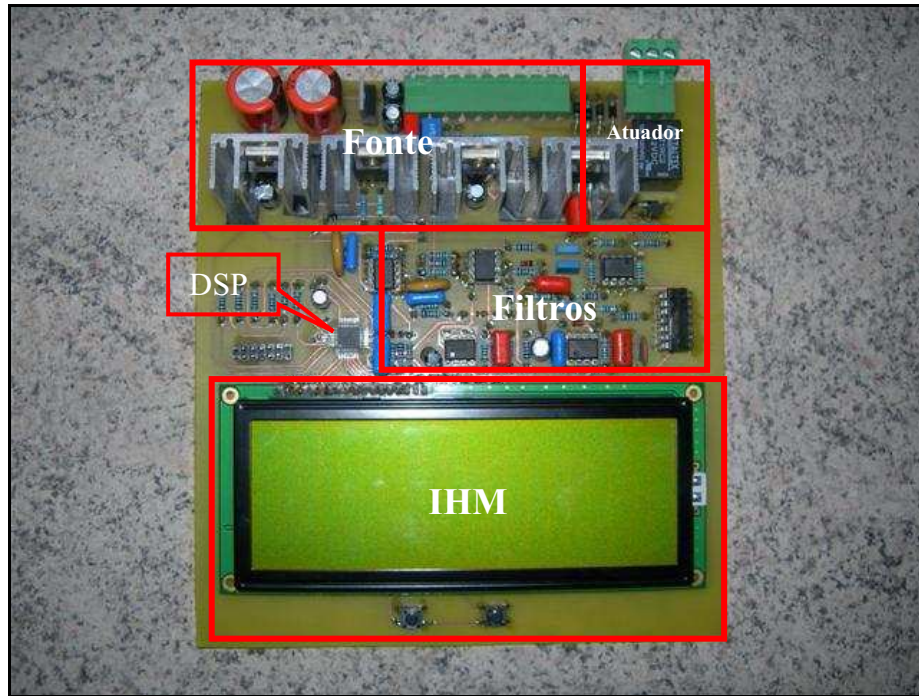


Figura 65: Protótipo do detector de metais.

4.6.1 Saída do circuito analógico

O circuito analógico é composto por várias etapas que foram simuladas separadamente, mas com o protótipo funcionando é possível verificar seu funcionamento como um todo. A Figura 66 apresenta uma captura de tela do osciloscópio no momento em que uma amostra de metal (ferro) de 19 mm terminou de atravessar as bobinas receptoras.

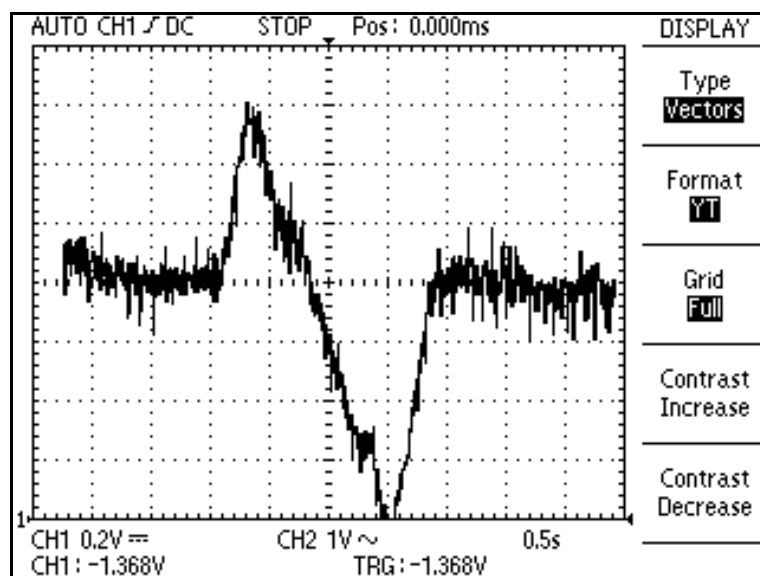


Figura 66: Captura de tela do osciloscópio.

Observando a forma de onda na saída do circuito analógico é possível notar que ela se assemelha muito com o formato esperado, isto comprova que os circuitos de filtro e amplificação estão funcionando adequadamente.

4.6.2 Algoritmo do filtro casado no DSP

Para verificar o funcionamento do algoritmo do filtro casado foi necessário interagir com o DSP durante o processamento. Isto é possível, pois o ambiente de programação permite que se faça a depuração do software no próprio circuito. Assim sendo, para verificar o comportamento do algoritmo do filtro casado o programa foi parado logo após ter detectado uma partícula metálica de 6 mm. Os dados foram transferidos da memória do DSP para o computador e os gráficos resultantes destes dados podem ser vistos nas figuras a seguir.

A Figura 67 mostra o conteúdo do vetor de entrada após a passagem da amostra de metal de 6 mm. Observe que a amostra é pequena e assim o sinal é bastante distorcido.

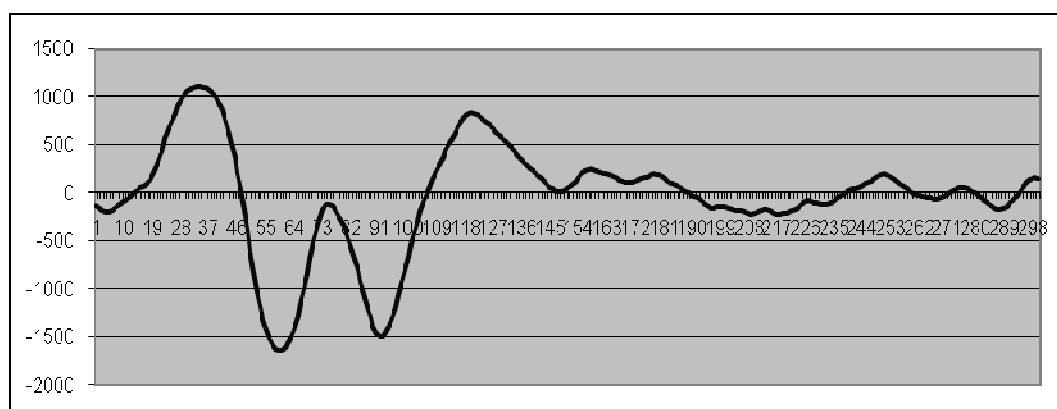


Figura 67: Sinal no vetor de entrada.

O eixo x representa o número da amostra, de um total de 300 amostras. O eixo y representa a amplitude do sinal lido da entrada analógica, já com seu nível médio removido e adequado a uma variável de 16 bits. Como este vetor é composto por valores inteiros de 16 bits, assim pode assumir valores de -32768 a 32767.

A Figura 68 apresenta o padrão a ser detectado. Este sinal é gerado automaticamente pelo DSP baseado na velocidade com que a amostra passa pelas bobinas detectoras. Isto é possível pois a forma do sinal não varia com o tamanho e o material da amostra.

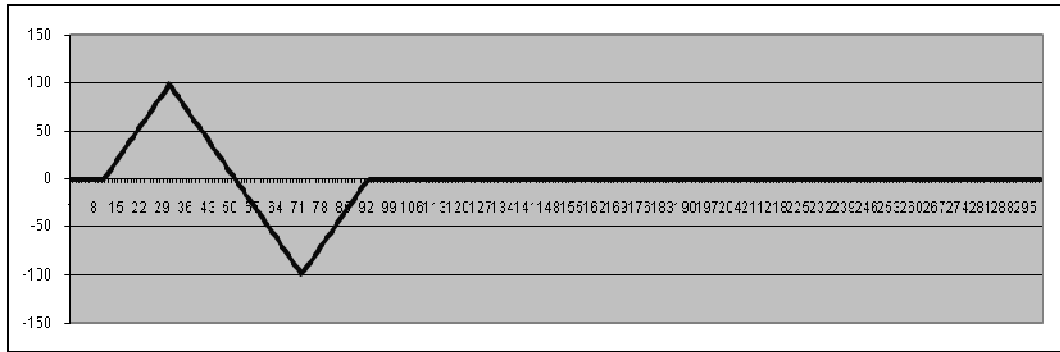


Figura 68: Padrão a ser detectado pelo filtro.

Observando as duas figuras é possível notar que o período do sinal gerado pela passagem do metal nas bobinas detectoras é semelhante ao período do padrão gerado pelo DSP.

O resultado do filtro casado pode ser observado na Figura 69. Este resultado é obtido pela convolução do sinal de entrada com o inverso no tempo do padrão a ser detectado.

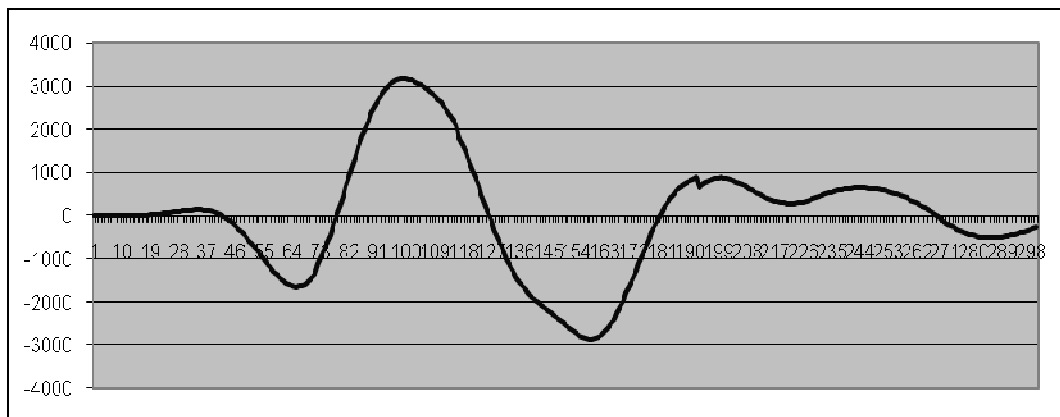


Figura 69: Sinal na saída do filtro casado.

Observando a saída do filtro casado nota-se que a forma de onda está de acordo com o esperado. A detecção do momento em que o metal passa pelas bobinas é simplificado por este processo de filtragem, pois o sinal na saída do filtro apresenta um pico bem característico neste momento.

A Figura 70 apresenta num único gráfico as mesmas três formas de onda para uma amostra de 19 mm de diâmetro.

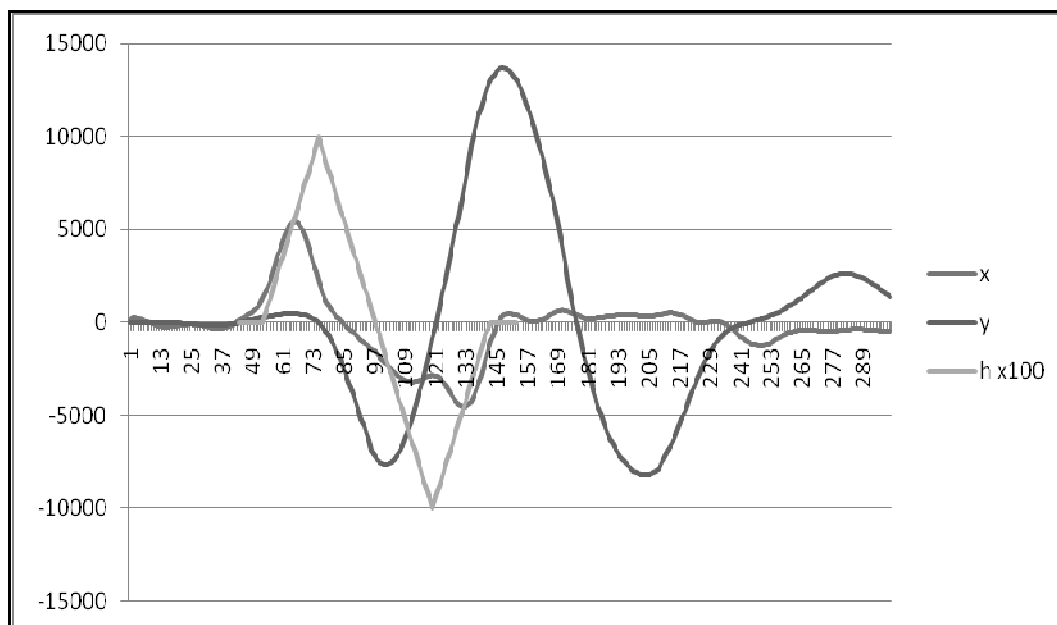


Figura 70: Formas de onda no DSP para uma amostra de 19 mm.

Com o aumento do tamanho da amostra fica ainda mais fácil observar como as formas de onda se aproximam dos resultados das simulações.

4.7 RESULTADOS COMPARATIVOS

Para verificar a sensibilidade do equipamento foram feitos vários ensaios. Os mesmos ensaios foram realizados com o protótipo e com outro equipamento comercial que se encaixa na mesma classe de detectores de metais. O equipamento usado foi o detector da marca Shadow, que também opera com bobinas planas, já descrito anteriormente neste trabalho. Para este teste, foram escolhidas três esferas metálicas, uma de 6 mm de diâmetro, uma de 19 mm de diâmetro e uma de 34 mm de diâmetro. O formato de esfera das amostras foi escolhido por ser amplamente utilizado para testes nos detectores, uma vez que o formato da amostra interfere nos resultados.

Os testes consistiram em passar cada uma das amostras várias vezes pelos detectores, em uma esteira com velocidade constante. A distância da esfera até as bobinas detectoras foi sendo lentamente aumentada até o ponto em que o detector não mais conseguia detectar a passagem da mesma. Estes testes foram realizados em duas velocidades diferentes, 0,2 m/s e 0,5 m/s.

A Figura 71 apresenta os resultados destes testes, a sensibilidade foi medida através da distância máxima em milímetros em que uma amostra pode ser detectada.

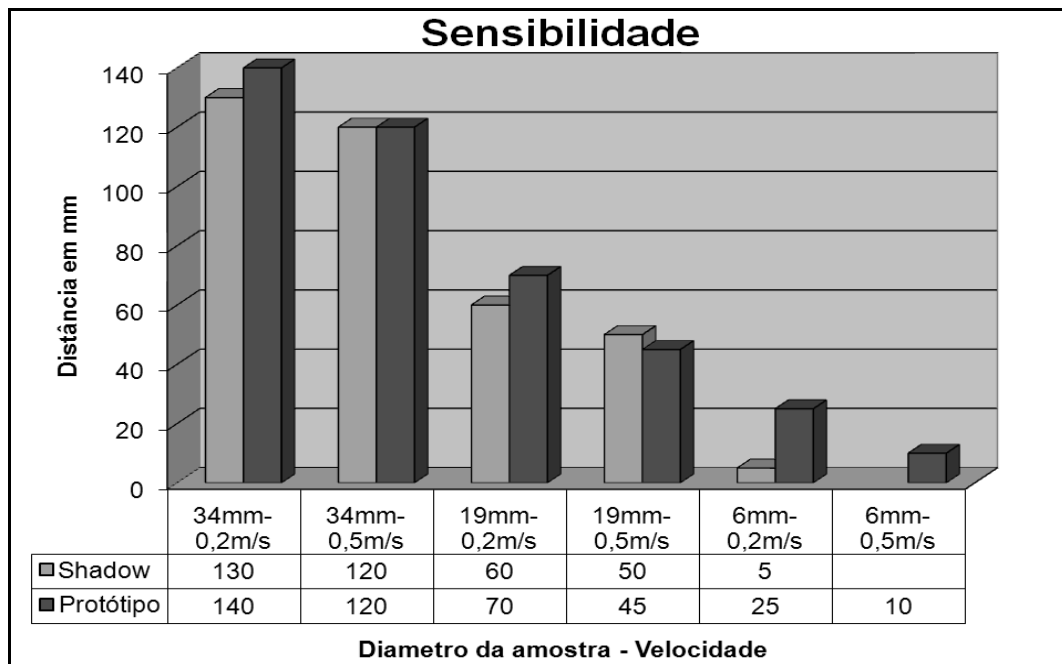


Figura 71: Resultado dos testes comparativos.

Estes testes foram realizados utilizando duas bobinas equivalentes, as distâncias podem ser aumentadas com a troca das bobinas detectoras, tanto para o protótipo quanto para o detector Shadow.

Observando os resultados nota-se que o protótipo é mais eficiente na distancia de detecção na grande maioria dos casos, principalmente para amostras muito pequenas.

Estes resultados foram obtidos com bobinas detectoras de 200mm de largura, bobinas mais largas resultam em distâncias maiores.

Os testes foram realizados na presença de motores e inversores de frequência, que são fontes de ruídos e simulam o ambiente industrial.

4.8 COMPARATIVO DE CUSTOS

Outra informação muito importante quando se está desenvolvendo um produto é o custo final, já que existe a intenção de transformar este protótipo em um produto comercial. Para encontrar o custo final do protótipo, foram somados os custos dos materiais e os custos de produção. Para comparar com o que já existe no mercado também foram levantados os

custos que a Automatic tem na aquisição de um detector da Shadow. A Tabela 2 apresenta o resultado destes levantamentos.

Tabela 2: Comparativo de custos.

	Protótipo (produção)	Shadow (aquisição)
Detector	R\$ 380,00	R\$ 1.300,00
Bobina	R\$ 180,00	R\$ 800,00
Total	R\$ 560,00	R\$ 2.100,00

É importante salientar que os custos tabelados para o detector de metais da marca Shadow são os custos que a Automatic tem na aquisição deste equipamento e não os custos de produção, uma vez que o fabricante não fornece estes dados.

Os custos de produção do protótipo levaram em conta o custo dos componentes, das placas de circuito, das embalagens e da mão de obra de montagem.

4.9 FACILIDADE DE OPERAÇÃO E AJUSTE

Também é importante salientar que devido a utilização do DSP foi possível elaborar um algoritmo de auto ajuste, o que facilita em muito a instalação e operação do equipamento. Enquanto em outros equipamentos é necessário ajustar inúmeros potenciômetros e ao mesmo tempo efetuar medidas de tensão na placa, no protótipo basta posicionar uma amostra de metal sobre a esteira e acionar o algoritmo de auto ajuste. No modo de auto ajuste o protótipo detecta a velocidade da esteira e ajusta todos os parâmetros sem a intervenção do operador. O algoritmo de auto ajuste também é responsável por gerar o padrão a ser detectado pelo filtro casado.

Durante a operação é necessário ajustar a sensibilidade dos equipamentos, de modo a não ocorrer falsos disparos. Isto é feito de forma simples, basta apenas acionar dois botões, um para aumentar e outro para diminuir. A IHM mostra o valor atual, numa escala de 0 a 100%. A IHM mostra também o valor lido atualmente dos sensores, assim o operador pode acompanhar o processo com mais facilidade.

CAPÍTULO 5

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Aqui serão discutidos os resultados apresentados no capítulo anterior.

5.1.1 Análise dos resultados da simulação do algoritmo

Como o objetivo principal deste trabalho é aplicar filtros casados nos detectores de metais, os resultados destas simulações foram muito importantes.

Os gráficos do capítulo anterior mostram como o filtro casado é eficiente em detectar um determinado padrão em um sinal, mesmo que este sinal seja muito ruidoso. Estes resultados mostram que a metodologia utilizada está correta, pois os resultados estão dentro do esperado. O que limita a sensibilidade e a estabilidade dos detectores de metais é a dificuldade que se tem de diferenciar o sinal gerado pela passagem do metal nas bobinas detectoras do ruído induzido neste sinal. Utilizando o filtro casado para maximizar a relação sinal/ruído esta dificuldade é reduzida, podendo assim o equipamento ter um ganho de desempenho.

5.1.2 Resultados da simulação dos filtros analógicos

Foram construídos principalmente dois filtros no circuito do detector de metais e seu comportamento foi simulado no computador.

O primeiro filtro é um passa faixa com frequência central de 10kHz. Este filtro foi introduzido no circuito para remover o ruído induzido nas bobinas, uma vez que estas estão normalmente próximas a motores, inversores de frequência e outros equipamentos que geram muito ruído. A principal dificuldade no desenvolvimento deste filtro foi conseguir uma combinação de componentes comerciais que se adequasse aos valores encontrados nos cálculos. Os resultados encontrados na simulação foram muito bons, uma vez que refletiram

com exatidão o que se tinha projetado. Uma característica importante deste filtro é a remoção dos ruídos na faixa de 60Hz, pois a maior parte do ruído induzido nas bobinas está em torno desta frequência e suas harmônicas.

O segundo filtro analógico a ser desenvolvido é um filtro passa baixas, com uma frequência de corte em torno dos 2 Hz. Este filtro tem dois objetivos no circuito, o primeiro é remover ruídos induzidos no circuito, uma vez que o sinal gerado pela passagem do metal é de baixa frequência, o segundo e principal objetivo deste filtro é remover todo o sinal de 10kHz, deixando passar assim apenas a modulação deste sinal gerada pela passagem do metal nas bobinas. As simulações mostraram que este filtro se comporta conforme esperado e assim cumpre sua função no circuito.

5.1.3 Comportamento do circuito detector de fase

O circuito detector de fase não é de vital importância para o funcionamento do protótipo, uma vez que o seu sinal não é aplicado diretamente no filtro casado, e serve apenas para provocar um alarme se o defasamento ultrapassar um valor máximo ajustado no software. Este circuito foi construído na realidade prevendo uma futura implementação de um detector de metais com capacidade de distinguir entre diferentes tipos de metal.

O resultado das simulações deste circuito foi satisfatório, uma vez que através dele é possível detectar qualquer alteração na fase entre os dois sinais recebidos das bobinas detectoras.

5.1.4 Análise do comportamento do amplificador diferencial

Diferente do circuito do detector de fase, o amplificador diferencial é de vital importância para o funcionamento do detector de metais. O amplificador diferencial é responsável por detectar e amplificar as pequenas diferenças de tensão entre as duas bobinas detectoras, diferença que é gerada pela passagem de algum metal. O amplificador deve ser capaz de detectar e amplificar diferenças de amplitude e diferenças de fase entre as duas senoides, pois dependendo das características magnéticas do metal os sinais recebidos podem sofrer apenas uma das alterações: ou de fase ou de amplitude, apesar do sinal normalmente sofrer alterações tanto na fase como na amplitude.

Os resultados obtidos na simulação deste circuito foram muito bons. O circuito se mostrou eficiente tanto na amplificação das diferenças de fase como na amplificação das diferenças de amplitude.

Como este circuito é capaz de detectar e amplificar qualquer tipo de variação no sinal é ele o responsável por enviar o sinal que é processado pelo filtro casado.

5.1.5 Funcionamento do protótipo

Para que todos os resultados das simulações sejam realmente aplicáveis em um produto real é necessário que se comprove o funcionamento do conjunto na prática. Com este objetivo foi construído um protótipo.

5.1.5.1 O comportamento do circuito eletrônico

Quando posto o protótipo em funcionamento, foram realizadas várias medidas, principalmente no que diz respeito ao funcionamento do circuito analógico. Este circuito analógico compreende além dos filtros já testados através de simulações, os circuitos auxiliares, como fontes, teclas de parametrização e tela de cristal líquido.

Todos os testes realizados mostram que o circuito se comportou exatamente como o projetado e simulado, validando assim todas as simulações realizadas no computador.

Outro componente do circuito é o conjunto de bobinas. A opção de construir as bobinas em placa de circuito impresso melhorou a qualidade deste componente. Outra vantagem das bobinas em placa de circuito é a redução do custo de produção, portanto, os resultados obtidos com estas bobinas foram muito bons.

5.1.5.2 Análise do software do DSP

Para que todo o conjunto funcione, é necessário que o software do DSP desempenhe suas funções de forma precisa. Para verificar o funcionamento do DSP e de seu software, foram analisados vários itens, como por exemplo, a estabilidade do sinal de 10kHz por ele gerado.

Os resultados foram positivos, o DSP se comportou como o esperado. O principal teste realizado com o software do DSP foi para verificar a implementação do filtro casado, que funcionou de acordo com o software simulado no computador.

Para este teste foram capturados os dados na memória do DSP, durante a operação. A análise destes dados mostrou que o algoritmo do filtro casado implementado no DSP funcionou de acordo com o esperado.

5.1.5.3 Comparações com outro produto comercial

A fim de descobrir se o método em questão e, conseqüentemente, o protótipo tinham qualidade suficiente para gerar um produto comercializável, foram realizados teste comparativos entre o protótipo e um detector de metais marca Shadow. O detector Shadow é apropriado para comparação, pois se destina ao mesmo tipo de aplicação e à mesma fatia de mercado, ou seja, as características do protótipo devem ser equivalentes, sem que o custo seja superior.

As comparações realizadas se dividiram em duas áreas, qualidade do equipamento e custos. A Figura 71 mostra que o protótipo foi mais sensível do que o detector Shadow na maioria dos testes. Este resultado comprova a viabilidade técnica da utilização de filtros casados em detectores de metais.

Quanto aos custos, é um pouco difícil de comparar, pois não se tem como determinar o custo de produção do detector de metais marca Shadow, mas comparando os custos de produção do protótipo com o custo de aquisição do detector Shadow e levando em consideração que este custo é para o distribuidor e não para o comprador final, pode-se notar que é possível transformar o protótipo em um produto comercializável com uma boa margem de lucro.

5.2 CONCLUSÕES

Lembrando os objetivos propostos no início deste trabalho pode-se dividir as conclusões em gerais e específicas.

5.2.1 Conclusões gerais

Investigando o funcionamento dos detectores de metais é possível concluir que se trata de um assunto amplo, onde várias técnicas são empregadas para vários fins diferentes. Por exemplo, é diferente construir um detector de metais para detectar minas terrestres e construir um detector de metais para detectar objetos metálicos em uma pedreira. Também é necessário que se detecte com mais precisão objetos metálicos em uma fábrica de alimentos do que em uma fábrica de papel. Assim, conclui-se que existem diferentes tipos de detectores de metais para diferentes aplicações e este trabalho se restringe apenas a detectores industriais com bobinas planas.

Também é possível concluir que bobinas construídas a partir de uma placa de circuito impresso são mais precisas, pois não dependem de um cuidadoso posicionamento dos fios que compõe as bobinas. Outra vantagem deste tipo de bobinas é o baixo custo.

A partir do estudo realizado sobre os filtros casados conclui-se que são excelentes mecanismos para maximizar a relação sinal/ruído. Estes filtros estão sendo empregados no processamento de vários tipos de sinais, como em sinais de GPS, por exemplo, isso demonstra sua aplicabilidade em problemas práticos.

Outro desafio a que este trabalho se propôs foi desenvolver o algoritmo do filtro casado em um DSP e, observando o comportamento do algoritmo desenvolvido, conclui-se que este objetivo foi alcançado.

Observando o funcionamento do protótipo conclui-se que o objetivo de desenvolver um protótipo de detector de metais que utiliza a técnica proposta foi cumprido. Os resultados comparativos entre o protótipo e o detector Shadow nos permite concluir que é possível fabricar um equipamento que seja comercialmente viável e utilize a técnica proposta.

5.2.2 Conclusão específica

Levando em consideração que o objetivo principal deste trabalho foi aplicar os filtros casados nos detectores de metais e observando os resultados obtidos nas simulações e no protótipo, podemos concluir que os filtros casados são apropriados para tratar os sinais oriundos das bobinas nos detectores de metais, melhorando seu desempenho sem aumentar seus custos.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

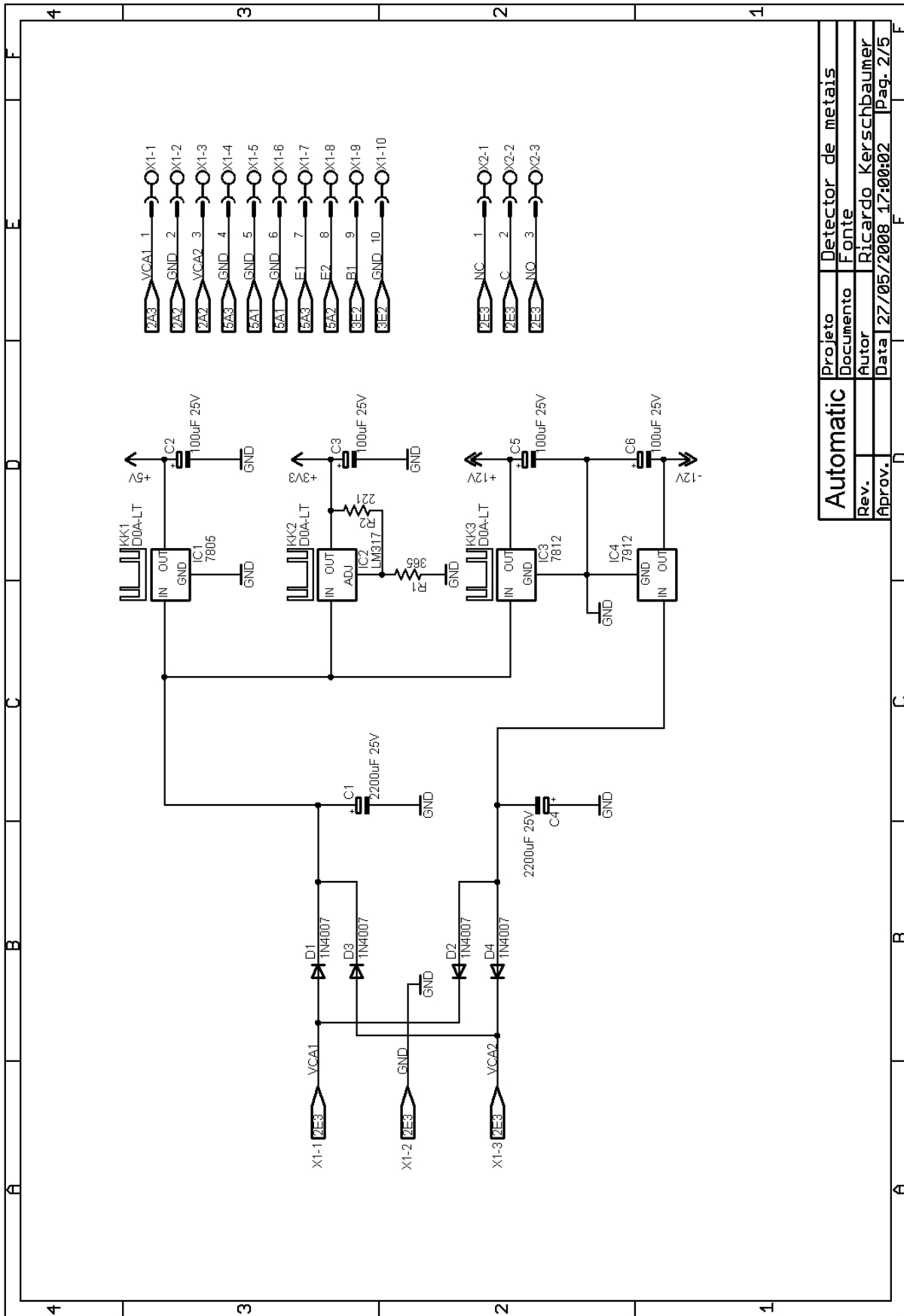
Vários aspectos deste trabalho ainda podem ser aprofundados, dentre eles pode-se destacar os seguintes:

- Identificação dinâmica da velocidade da esteira. No modelo atual, a velocidade da esteira é ajustada com o auxílio do operador, uma mudança no algoritmo poderia estimar a velocidade da esteira dinamicamente, evitando assim erros de operação. Este processo é bastante difícil e depende da passagem de algum metal que sirva como referência.
- Outro ponto a ser desenvolvido é a utilização do sinal de diferença de fase na determinação das características do metal que está sendo detectado. Este sistema permite que se utilize, por exemplo, embalagens metalizadas sem denegrir a sensibilidade do detector.
- Também é interessante estudar a possibilidade de utilizar um DSP de maior capacidade de processamento, de forma a fazer as filtrações por software, a fim de diminuir o tamanho do circuito externo, diminuindo assim ainda mais os custos do produto final.
- As bobinas detectoras construídas a partir de placas de circuito impresso se mostraram mais eficientes e mais baratas, seria interessante aprofundar mais este assunto. É possível testar diferentes topologias, variando o tamanho a forma e o número de espiras destas bobinas.
- Outro trabalho que é necessário para tornar o produto comercializável é a alteração do formato da placa de circuito de forma a utilizar uma embalagem comercial. A estabilidade mecânica e a imunidade a ruídos desta embalagem são itens importantes a serem estudados.

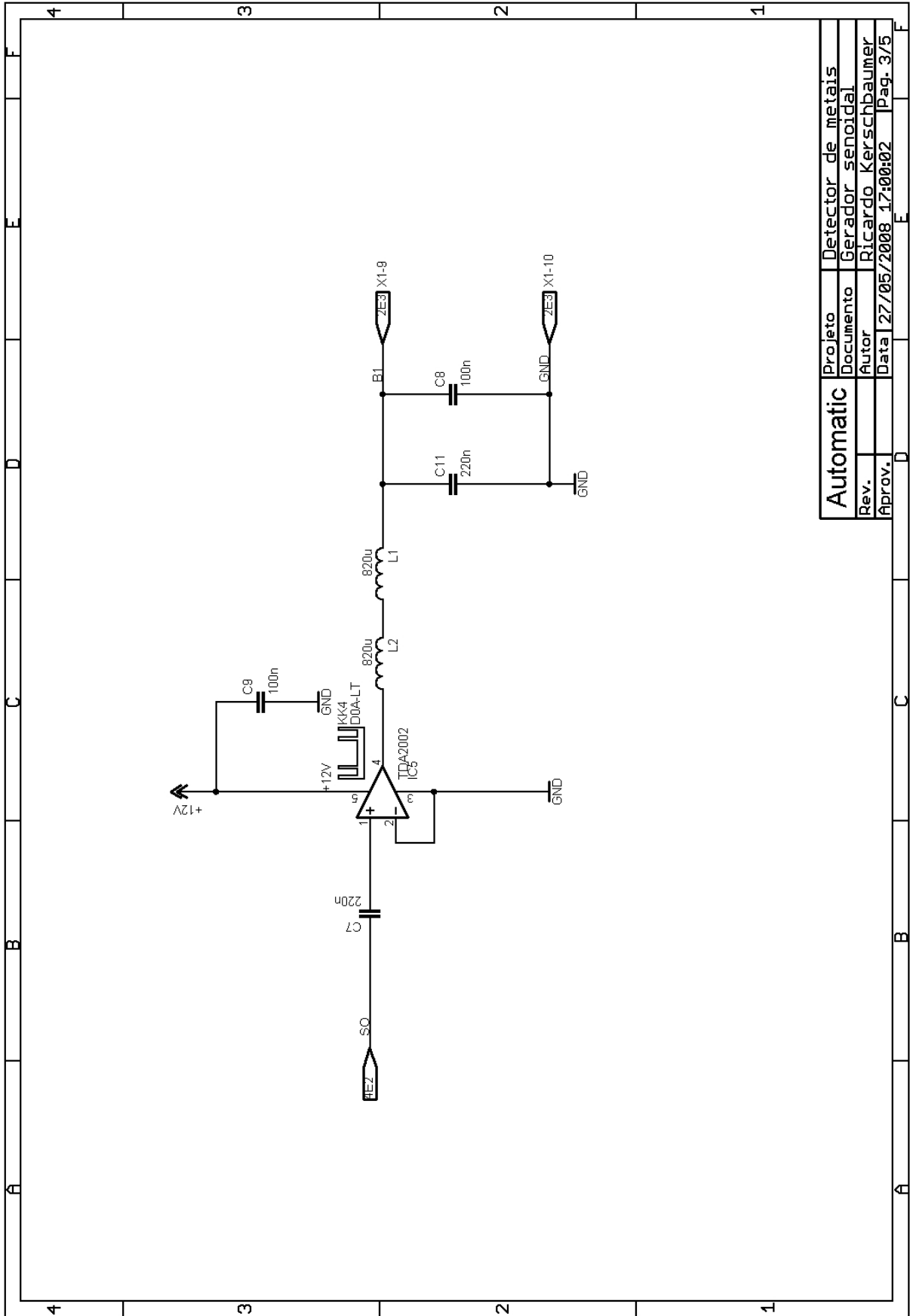
ANEXO 1

ESQUEMA ELETRONICO COMPLETO DO DETECTOR DE METAIS

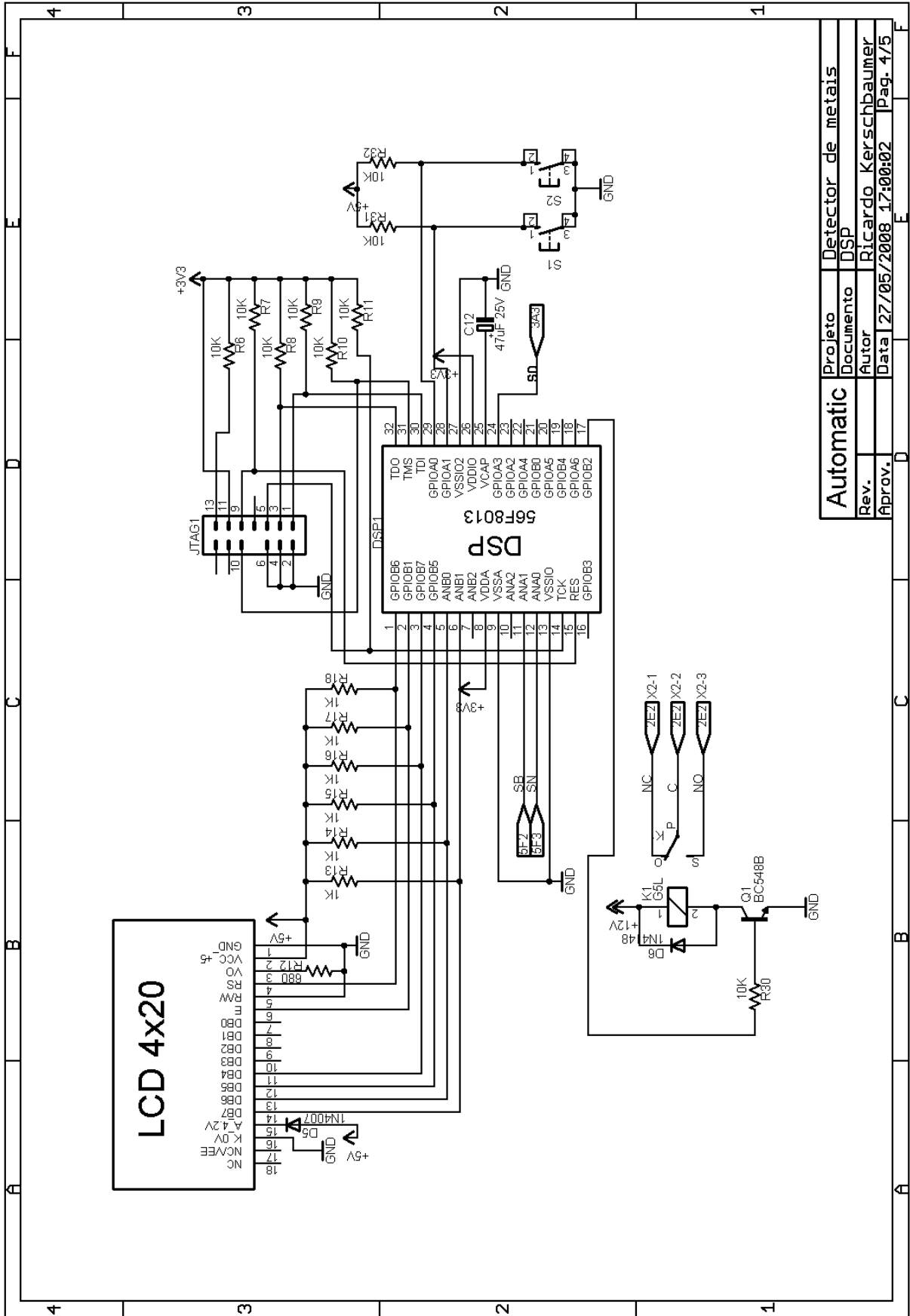
4	3	2	1														
<p>Projeto: Detector de Metais</p> <p>Documento: Esquema eletrônico</p> <p>Automatic</p> <p>Ricardo Kerschbaumer</p>				<table border="1"> <tr> <td>Projeto</td> <td>Detector de metais</td> </tr> <tr> <td>Documento</td> <td>Cada</td> </tr> <tr> <td>Autor</td> <td>Ricardo Kerschbaumer</td> </tr> <tr> <td>Data</td> <td>12/05/2008 17:00:02</td> </tr> <tr> <td>Rev.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprov.</td> <td></td> </tr> </table>		Projeto	Detector de metais	Documento	Cada	Autor	Ricardo Kerschbaumer	Data	12/05/2008 17:00:02	Rev.		Aprov.	
Projeto	Detector de metais																
Documento	Cada																
Autor	Ricardo Kerschbaumer																
Data	12/05/2008 17:00:02																
Rev.																	
Aprov.																	
A	B	C	D	E	F												



Projeto	Detector de metais
Documento	Fonte
Autor	Ricardo Kerschbaumer
Data	27/05/2008 17:00:02
Rev.	1
Aprov.	2/5

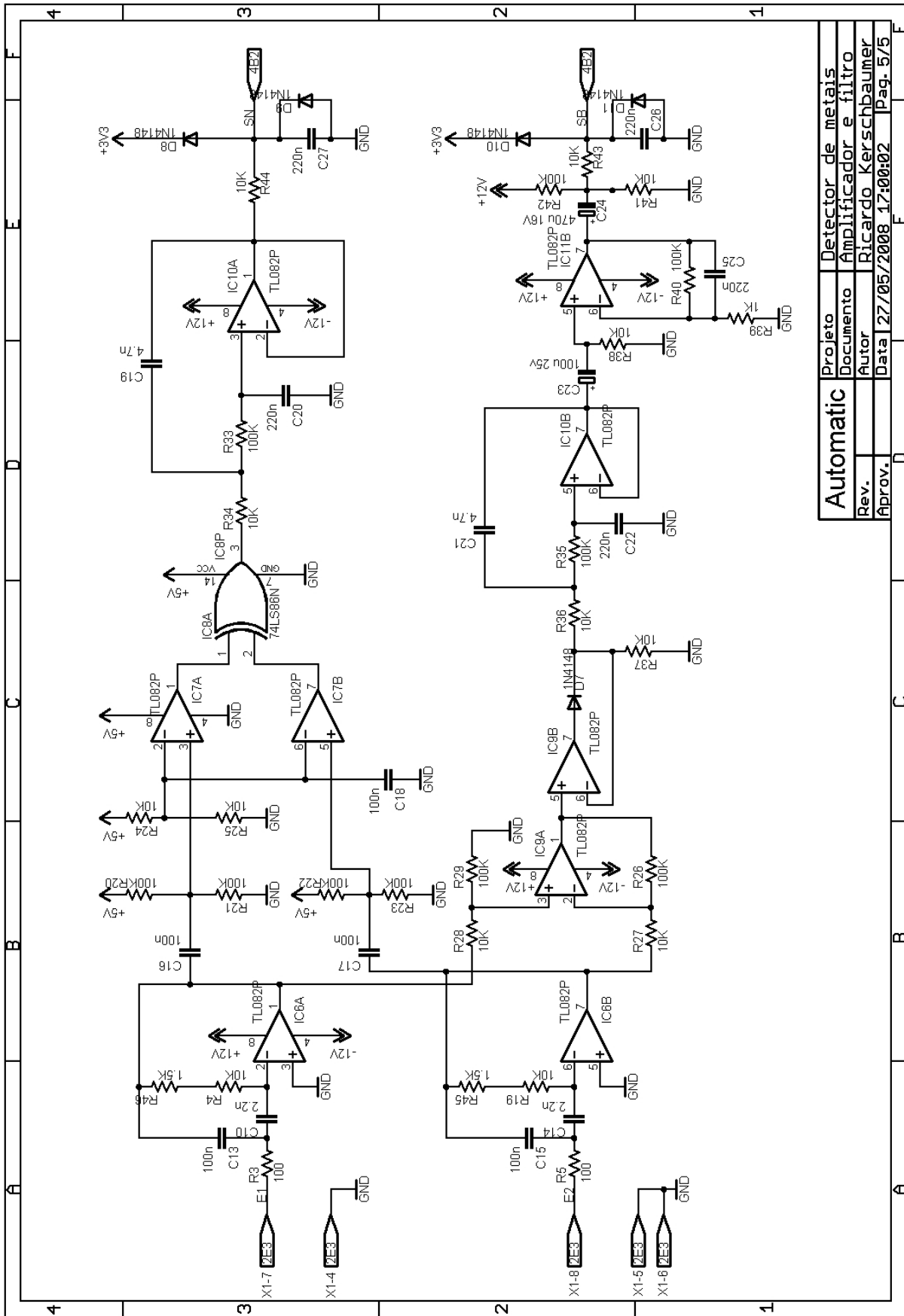


Automatic		Projeto	Detector de metais
Rev.		Documento	Gerador senoidal
Aprov.		Autor	Ricardo Kerschbaumer
		Data	27/05/2008 17:00:02
			Pag. 3/5



Projeto	Detector de metais
Documento	DSP
Author	Ricardo Kerschbaumer
Data	27/05/2008 17:00:02
Rev.	1
Aprov.	1

Automatic	Detector de metais
Documento	DSP
Author	Ricardo Kerschbaumer
Data	27/05/2008 17:00:02
Rev.	1
Aprov.	1



Projeto	Detector de metais
Documento	Amplificador e filtro
Autor	Ricardo Kerschbaumer
Data	27/05/2008 17:00:02
Rev.	
Aprov.	
	Pag. 5/5

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- YAMAZAKI, S., NAKANE, H., TANAKA, A. Basic analysis of a metal detector. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 51, n. 4, p. 810-814, august. 2002.
- SILVESTER, P. P., Sensitivity Maps for Metal Detector Design. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 34, n. 3, p. 788-792, may. 1996.
- SILVESTER, P. P., OMERAGIC, D., Sensitivity of Metal Detectors to Spheroidal Targets. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 33, n. 6, p. 1331-1335, november. 1995.
- GRAY, J. Development of an advanced industrial metal detector instrumentation. **Computing & Control Engineering Journal**, p. 117-120, june. 1994.
- DAS, Y., Effects of Soil Electromagnetic Properties on Metal Detectors. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 44, n. 6, p. 1444-1453, june. 2006.
- FANTE, R., L., **Signal analysis and estimation: an introduction**. New York: John Wiley & Sons, 1988.
- TURIN, G., L., An introduction to matched filters. **IRE Transactions on information theory**. June. 1960.
- PADAN, U., Adaptive digital matched filters. **IRE Transactions on information theory**. v. 28, n. 6, p. 890-904, november. 1982.
- GERLACH, K., BLUNT, S., D., PICCIOLO, M., L., Robust adaptive matched filtering using the fracta algorithm. **IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems**. v. 40, n. 3, p. 929-945, july 2004.
- BAHER, H. **Analog & digital signal processing**. New York: John Wiley & Sons, 1994.

PAARMANN, L. D. **Design and analysis of analog filters: a signal processing perspective.**

Wichita: Springer, 2001.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGA^a ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

“Aplicação de Filtros Casados em Detectores de Metais”

por

Ricardo Kerschbaumer

Esta Dissertação foi apresentada no dia 04 de julho de 2008, como requisito parcial para a obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Informática Industrial. Aprovada pela Banca Examinadora composta pelos professores:

Prof. Dr. Volnei Pedroni
(Orientador - UTFPR)

Prof. Dr. Antonio Heronaldo de Sousa
(UDESC)

Prof. Dr. Richard Demo Souza
(UTFPR)

Visto e aprovado para impressão:

Prof. Dr. Hugo Reuters Schelin
(Coordenador do CPGEI)

RESUMO:

Este trabalho apresenta uma nova forma de tratar digitalmente os sinais nos detectores de metais, a fim de melhorar sua sensibilidade e estabilidade, sem contudo, aumentar seu custo. A técnica proposta é a aplicação de filtros casados no tratamento dos sinais oriundos das bobinas detectoras, uma vez que estes sinais sofrem grande interferência de ruídos do ambiente. Os filtros casados são aplicados de forma a maximizar a relação sinal/ruído, melhorando assim o desempenho destes equipamentos. Para comprovar a eficiência desta técnica, foi construído um protótipo de detector de metais e seu desempenho foi comparado com outros equipamentos no mercado. Os resultados mostraram que esta técnica é eficaz, realmente aumenta a sensibilidade e estabilidade destes equipamentos. Outro resultado importante é que empregando filtros casados é possível construir detectores de metais mais baratos e com a mesma qualidade.

PALAVRAS-CHAVE

Detectores de metais, Filtros casados e processamento digital de sinais.

ÁREA/SUB-ÁREA DE CONHECIMENTO

3.04.00.00 – 7 Engenharia Elétrica

2008 N ^o : 480

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)