

MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Roberto Pereira Garcia Junior
Vinícius Santana Pereira da Silva

RADAR FMCW: PROCESSAMENTO DO SINAL EM TEMPO REAL USANDO LABVIEW

Rio de Janeiro

2015

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

**ROBERTO PEREIRA GARCIA JUNIOR
VINÍCIUS SANTANA PEREIRA DA SILVA**

**RADAR FMCW: PROCESSAMENTO DO SINAL EM TEMPO REAL USANDO
LABVIEW**

Relatório de Projeto Final de Curso
Orientadores: José Antonio Apolinário Junior
José Carlos Araújo dos Santos

Rio de Janeiro
2015

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha
Rio de Janeiro-RJ CEP 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica e completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor e do orientador.

621.3848	Garcia Junior, Roberto Pereira
G216r	Radar FMCW: processamento do sinal em tempo real usando labview / Roberto Pereira Garcia Junior, Vinicius Santana Pereira da Silva; orientados por José Antonio Apolinário e José Carlos Araújo dos Santos – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2015.
	36p. : il.
	Projeto de Fim de Curso (PROFIC) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.
	1. Curso de Engenharia Eletrônica – Projeto de Fim de Curso. 2. Radar. 3. Processamento de sinais. I. Silva, Vinicius Santana Pereira da. II. Apolinario Junior, José Antonio. III. Santos, José Carlos Araújo dos. IV. Título. V. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

ROBERTO PEREIRA GARCIA JÚNIOR

VINÍCIUS SANTANA PEREIRA DA SILVA

**RADAR FMCW: PROCESSAMENTO DO SINAL EM TEMPO REAL USANDO
LABVIEW**

Trabalho de Projeto de Final de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica do Instituto Militar de Engenharia.

Orientadores: José Antonio Apolinário Junior

José Carlos Araújo dos Santos

Aprovado em 29 de Maio de 2015 pela seguinte banca examinadora

Professor José Antonio Apolinário Junior - D.Sc., do IME

Professor José Carlos Araújo dos Santos – Ph.D., do IME

TC Felipe Aurélio Caetano de Bastos - D.Sc., do IME

Rio de Janeiro

2015

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURA.....	6
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	7
SÍMBOLOS.....	7
RESUMO	9
1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Breve Histórico.....	10
1.2 Motivação	11
1.3 Objetivos	12
1.4 Estrutura do Trabalho.....	13
2 Princípio de funcionamento do radar	13
2.1 Fundamentos Teóricos	13
2.2 Equação do radar	13
2.3 Tipos de radares.....	13
2.3.1 Radar de Pulso	13
2.3.2 Radar de Onda Contínua.....	15
2.3.4 Funcionamento	15
2.4 Radar de onda Contínua com Modulação de Frequência Linear	16
2.4.1 Modulação da portadora	16
2.4.2 Formas de Ondas usados na modulação em frequência linear.....	17
2.4.2 Estimação da posição e velocidade através de um radar FMCW.....	18
2.4.3 Resolução de Distância.....	20
3 Modelagem e simulações.....	21
3.1 Formas de onda enviadas e recebidas pelo transmissor	21
3.1.1 Conversão do Sinal e filtragem do Sinal.....	22
3.2. Transformada rápida de Fourier (FFT).....	23
3.2.1 Formulação Matemática	24
3.3 Identificação do eco do sinal recebido	24
3.4 Predição Linear.....	25
4 Processamento do Sinal em LabVIEW	27
4.1 Conceitos básicos sobre programação em LabVIEW.....	27
4.1.1 Principais componentes de um VI.....	27
4.1.2 Programação do fluxo de dados <i>Dataflow</i>	28
4.2 Dispositivo de hardware embarcado NI myRIO	29
4.3 Sistema completo.....	31
4.4 Resultados	32
5 Conclusões.....	36
6 Referências Bibliográficas	37

Índice de Figuras

Figura 2.1 Temporização para um radar pulsado.....	14
Figura 2.2 Sistema de Radar com ambiguidade em distância.....	14
Figura 2.3 Diagrama de Bloco do Radar CW.....	15
Figura 2.4 Possíveis espectros do sinal recebido	16
Figura 2.5 Forma de Onda Dente-de-Serra	17
Figura 2.6 Forma de Onda Triangular	18
Figura 2.7 Frequências transmitidas e recebidas em função do tempo juntamente com o batimento	19
Figura 3.1 Diagrama de bloco de um radar FMCW.....	21
Figura 3.2 Simulação de um sinal enviado por um radar FMCW.....	22
Figura 3.3 Filtro Passa Baixa utilizado no projeto	23
Figura 3.4 Espectro de frequência de um sinal de áudio e o limiar de corte escolhido	25
Figura 3.5 Diagrama de blocos de um preditor linear para frente	26
Figura 3.6 Espectro de frequência após a suavização via predição linear	26
Figura 3.7 Painel frontal	27
Figura 3.8 Exemplo de diagrama de blocos	28
Figura 3.9 Exemplo de comandos e indicadores	28
Figura 3.10 Definição de um ícone	29
Figura 3.11 Mapeamento do LabVIEW para o FPGA	30
Figura 3.12 Sinal de áudio com duas entradas	30
Figura 3.13 Blocos de memórias utilizados no FPGA	30
Figura 3.14 Ni myRIO utilizado no projeto	31
Figura 3.15 Esquemático da utilização do FPGA no processamento real do sinal	31
Figura 3.16 Diagrama completo do projeto.....	32
Figura 3.17 Trajetória de um móvel se movendo com 4m/s.....	32
Figura 3.18 Resultado após o processamento do sinal	33
Figura 3.19 Resultado após a suavização.....	33
Figura 3.20 Resultado do processamento considerando a potência dissipada	34
Figura 3.21 Resultado do processamento após o uso da suavização e considerando a potência dissipada	34
Figura 3.22 Resultado do processamento após o uso da suavização e considerando a potência dissipada.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

AM	<i>Amplitude Modulation</i>
CW	<i>Continuous Wave</i>
DFT	<i>Discret Fourier Transform</i>
ECM	Contramedidas eletrônicas
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FM	<i>Frequency Modulated</i>
FMCW	<i>Frequency Modulated Continuous Wave</i>
FPGA	<i>Field-programmable gate array</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of technology</i>
PM	<i>Phase modulated</i>
PRT	<i>Pulse repetition time</i>
PW	<i>Pulse Width</i>
RADAR	<i>Radio detection and ranging</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Array</i>
VI	<i>Virtual Instruments</i>

SÍMBOLOS

P_t	Potência transmitida
G	Ganho da antena
A	Área efetiva
σ_a	Seção transversal do alvo
S_{\min}	Menor potência capaz de ser detectada
r_{\max}	Alcance máximo
c	Velocidade da luz
V	Velocidade do objeto
λ	Comprimento de onda
f_d	Frequência Doppler
f_0	Frequência Central
β	Desvio de frequência
f_m	Frequência Modulante
ΔF	Banda de modulação
ΔT	Intervalo de Tempo

T_p	Metade do período da onda triangular
f_b	Frequência de batimentos
T_d	Tempo decorrido
ΔR_0	Resolução em distância
R	Matriz de auto-correlação
r	Matriz de correlação da entrada com a resposta desejada
W	Vetor de coeficientes do filtro ótimo

RESUMO

Neste trabalho realiza-se o processamento de sinais provenientes de radares FMCW. Inicialmente, faz um breve histórico sobre o desenvolvimentos dos radares ao longo dos anos. Após isso são apresentados os principais tipo de radares existentes. São eles os radares de onda contínua (CW) e os radares de pulsados. Em seguida, efetua-se o estudo de técnicas relacionadas a detecção espectral e suavização de curvas. Finalmente, é feita a implementação de um código capaz de processar um sinal de um radar FMCW.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Breve Histórico

O radar, palavra formada por radio detection and ranging, teve seus princípios básicos demonstrados em 1886 por Heinrich Hertz (1857 – 1894). Empregando a teoria eletromagnética de Maxwell e vários experimentos, Hertz descobriu a similaridade das propriedades das ondas de rádio e ondas ópticas. Comprovou que as ondas de rádio podem ser refletidas por componentes metálicos e por diferenças de características eletromagnéticas entre meios sucessivos. A primeira construção de um radar foi em 1904 pelo alemão Christian Hulsmeyer (1881 – 1957). Seu objetivo era implementar um equipamento de auxílio a navegação, com o intuito de evitar a colisão entre navios. No entanto, seu produto de baixa precisão e difícil construção não obteve o êxito esperado, despertando pouco interesse. [1]

Um grande impulso ao desenvolvimento de radares foi durante a década de 1930. Simultaneamente, Estados Unidos, Inglaterra, França e Alemanha passaram a atuar na detecção aérea e naval de alvos, obstáculos, etc. Nas aplicações militares e de segurança, esses novos processos permitiram a navegação aérea em maiores altitudes, com aviões capazes de transportar maior quantidade de cargas, garantir maior segurança de navios, obter informações de grande relevância na prevenção de inimigos, entre outras aplicações. [1]

A Inglaterra, nos anos da II Grande Guerra, manteve o desenvolvimento do radar concomitantemente com os americanos. Buscava, porém, maior exatidão para as suas necessidades de defesa, devido à sua posição vulnerável a ataques aéreos. Sir Wattson – Watt (1892- 1973), físico escocês, propôs um novo método de detecção e localização que determinou o início da tecnologia de radar pulsado. Em 1935, surgiram os primeiros testes com esse sistema para emprego em situações de conflito. Os radares forneciam informações como velocidade, distância e direção de ataque. Assim, houve um aumento na proteção a civis e militares durante os bombardeios constantes vindo dos ataques alemães, justificando a importância do instrumento.

Diversas outras situações demonstraram a necessidade de radares durante a II Guerra Mundial. Como exemplo, cita-se o sistema radar Chain Home utilizado na batalha da Inglaterra para proteger Londres, o estuário de Tâmesa e, posteriormente, estendido para cobrir parte do Sul, do leste da Inglaterra e da Escócia. Esses sistemas operavam nas faixas de radiofrequência, em torno de 22 MHz e 28MHz, não atingindo a região de microondas. Mesmo assim, os resultados e experiências desenvolvidas tiveram grande importância no aprimoramento dos novos equipamentos. No final da guerra, a tecnologia de microondas passou a ser melhor dominada, sugerindo a evolução dos sistemas para emprego dessa faixa do espectro eletromagnético. Os modelos originais não dispunham de grandes sofisticções, mas operavam livres de contramedidas eletrônicas (ECM), uma vez que os alemães não conheciam essa nova tecnologia. Durante os anos seguintes, o desenvolvimento foi muito acentuado, com portadoras em microondas, garantindo maior alcance e melhor controle sobre eventuais interferências nos sinais recebidos [2].

As tecnologias cresceram rapidamente, estimulando a fabricação de aviões militares com vôos mais baixos e velozes, na tentativa de neutralizar a ação dos novos equipamentos detectores. O problema ficou insolúvel por determinado período e a defesa aérea tornou-se uma tarefa ainda mais difícil. Em função da melhoria e da exatidão do processamento de sinal, os radares acabaram sendo instalados na própria aeronave. Os períodos de guerra e de pós-guerra

incentivaram o aprimoramento progressivo de diversas novas tecnologias, incluindo o radar, essencial para os dias de hoje para aplicações militares, de segurança, em controles de velocidade, posicionamento, no transporte e em vários processos industriais.

Significativas contribuições ocorreram com o progresso da tecnologia digital a partir da década de 1970. Surgiram as primeiras aplicações para medição de nível com o uso desse recurso em processos industriais. Inicialmente, optou-se pelo radar de conda contínua modulada em frequência (FMCW) para medir nível em tanques de petróleo. A partir da década de 1980, surgiram novas aplicações, porém ainda com custos inviáveis. Desde 1997, a medição de nível utilizando radar tornou-se mais conhecida no campo da instrumentação.

1.2 Motivação

Nas últimas décadas, grande parte dos sistemas baseados em circuitos analógicos de tempo contínuo passaram a ser implementados através de sistemas digitais de tempo discreto. Este fenômeno deve-se, em grande parte, à maior facilidade de acesso a placas dedicadas. Dentre as áreas que passaram por estas mudanças, destacam-se sistemas de telecomunicações, processamento de áudio e imagens, processamento de sinais de voz, sistemas de controle entre muitas outras aplicações. Nesse contexto, a motivação para a realização deste trabalho é entender de forma mais detalhada o processamento digital de sinais em tempo real, pois como foi citado, a grande facilidade a placas dedicadas fazem com que esse tema ganhe cada vez mais relevância para engenheiros eletrônicos e o bom entendimento dele é fundamental para que se esteja preparado para encarar novos desafios.

1.3 Objetivos

Este projeto final de curso tem por objetivo entender os principais conceitos de radar, dando ênfase no radar com modulação em frequência. Para isso são estudados tipos e as principais características dos radares. Além disso, é feito um programa em LabView capaz de processar o sinal proveniente do radar em tempo real. Para isso, inicialmente faz-se um programa em Matlab®, por questões didáticas e em seguidas foram feitas as adaptações necessárias para implementar em LabView.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está organizado em 5 capítulos, os quais atendem individualmente a objetivos específicos, mas que no âmbito global contribuem para atingir os objetivos desse projeto.

Este primeiro capítulo introduz o trabalho, apresentando a motivação que o deu origem, os objetivos que norteiam seu desenvolvimento e sua estruturação.

No segundo capítulo é realizado um estudo geral sobre os radares de onda contínua (CW) e os Radares Pulsados. Com destaque para os radares de onda contínua com modulação em frequência (FMCW).

O terceiro capítulo apresenta as ferramentas matemáticas necessárias para o processamento do sinal. Bem como, os aspectos referentes às escolhas do limiar de corte utilizado e a técnica de suavização utilizadas.

O quarto capítulo apresenta o processamento do sinal utilizando o LabView, descrevendo as

principais rotinas inicialmente implementadas em Matlab® (de maneira didática).

Por fim, o quinto e último capítulo é dedicado às conclusões do trabalho, às suas contribuições e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 Principio de funcionamento do radar

2.1 Fundamentos Teóricos

O radar é um sistema de detecção e telemetria utilizando ondas eletromagnéticas. Trata-se de um instrumento capaz de identificar características de determinados alvos, como distância, posição no espaço e velocidade. Utiliza sinais elétricos de altas frequências enviados em direção ao objeto a ser monitorado. A obtenção das informações é através da onda que retorna a partir de reflexões nesse objeto. Esta função é bastante geral e o radar tem tido inúmeras aplicações, incluindo medição de velocidade de automóveis em estradas, posição e velocidade de aeronaves, etc. Neste trabalho, usou-se um radar FMCW para medir a velocidade e posição de um objeto através do processamento digital do sinal recebido.

2.2 Equação do radar

Independentemente do tipo de radar utilizado para fazer as medições, seja radar FMCW ou radar de pulsos, o alcance máximo do sinal é [3]

$$r_{\text{máx}} = \left(\frac{P_t G A \sigma_a}{(4\pi)^2 S_{\text{mín}}} \right)^{1/4} \quad (2.1)$$

Onde P_t é a potência transmitida em Watts, G e A são o ganho e a abertura efetiva da antena, respectivamente, σ_a é a seção transversal do alvo e $S_{\text{mín}}$ é a menor potência capaz de ser detectada pelo receptor do radar. Verifica-se em (2.1) que os fatores como alta potência de transmissão, ganho e elevada abertura efetiva favorecem a detecção de alvos situados em longas distâncias. Deve-se destacar que a área efetiva e o ganho da antena são parâmetros relacionados e associados às dimensões da antena em relação ao comprimento de onda.

O parâmetro referente à seção transversal do alvo refere-se a uma área que, quando recebe potência incidente, remete uma parte em direção ao radar que a interpreta como sendo proveniente do alvo.

2.3 Tipos de radares

Nesta seção são apresentados os tipos de radares mais comumente usados dando ênfase para o radar de onda contínua modulado em frequência, pois este é o radar usado neste trabalho.

2.3.1 Radar de Pulso

O radar de pulso é identificado por um trem de pulsos curtos com determinada taxa de repetição que modula a portadora em intervalos regulares de tempo. Sua facilidade de implementação é um fator benéfico, resultando em pequena complexidade de processamento e menor custo.

Este tipo de radar é configurado com apenas dois parâmetros: A largura de pulso (PW – Pulse Width) e o tempo entre a repetição dos mesmos (PRT – Pulse repetition time). A Figura 2.1 ilustra esses parâmetros.

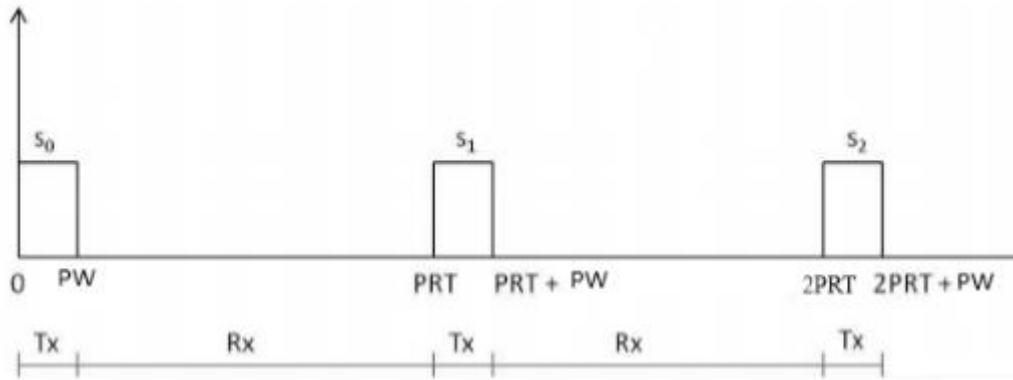


Figura 2.1: Temporização para um radar pulsado.

Através da largura de pulso consegue-se definir o limiar mínimo de detecção e através do tempo entre a repetição dos pulsos consegue-se definir o limiar máximo. No entanto, estes tipos de radares não conseguem evitar certos tipos de ambiguidades, já que podem ser detectados objetos que se encontrem além deste limiar sem que sua distância seja medida corretamente. Estas situações acontecem quando o tempo que decorre entre a emissão e a detecção é superior ao tempo de intervalo entre a emissão dos impulsos. A Figura 2.2 abaixo ilustra um exemplo onde ocorre ambiguidade na detecção do alvo.

Existem também uma zona cega, onde os objetos não são detectados. Nestes casos, a duração entre a emissão e a recepção do eco é menor do que a duração de emissão do pulso.

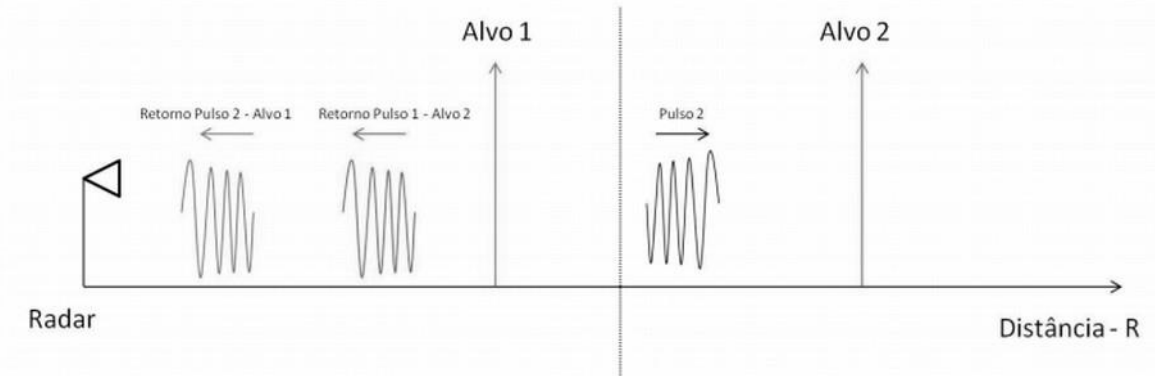


Figura 2.2: Sistema de Radar com ambiguidade em distância.

Pode ser demonstrado que a distância máxima sem ambiguidade, R_1 , é dado por

$$R_1 = \frac{c}{2PRT} \quad (2.2)$$

onde c é a velocidade da luz e PRT é o intervalo de repetição dos pulsos [1].

Além disso, o radar pode apresentar incertezas na medição causadas por interferências que levam a interpretações equivocadas sobre o tempo de retorno da onda e, conseqüentemente, sobre a distância medida. Existem diferentes causas dessas interferências, desde a detecção de partículas em suspensão até múltiplas reflexões no alvo. Deve-se levar em conta, também, que sua resolução é menor do que nos modelos de onda contínua e depende da largura do pulso comparada ao período de repetição [2].

2.3.2 Radar de Onda Contínua

Neste modo de funcionamento o radar está em contínua emissão, sendo por isso necessário separar os sinais emitido e recebido, de potências bem distintas. Para aumentar o isolamento entre o sinal emitido e o sinal recebido utiliza-se por vezes antenas distintas para a emissão e recepção.

Contudo, este isolamento é normalmente insuficiente. Uma forma de garantir o isolamento entre ambos os sinais é garantir que existe um movimento relativo entre o radar e o alvo, sendo feito o respectivo reconhecimento da variação de frequência causada pelo efeito Doppler. É através dessa variação de frequência que é possível estimar a velocidade relativa entre radar e objeto. Pela detecção desta frequência Doppler, a velocidade do objeto pode ser determinada.

A velocidade de um objeto se movendo em uma direção radial em relação ao radar (ou fonte de sinal) pode ser determinada pela seguinte equação,

$$V = \lambda \frac{f_d}{2} \quad (2.3)$$

onde V é a velocidade radial do objeto, λ é o comprimento de onda do sinal emitido pelo transmissor e f_d a frequência Doppler.

2.3.4 Funcionamento

O funcionamento de um radar de onda contínua pode ser exemplificado pelo diagrama de blocos da Figura 2.3

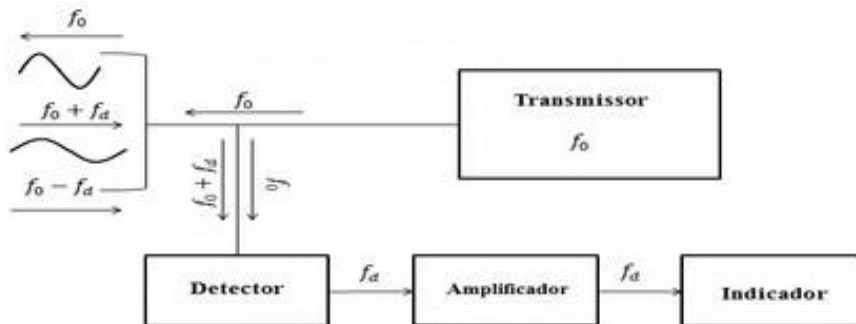


Figura 2.3: Diagrama de Bloco do Radar CW.

O emissor gera uma oscilação contínua de frequência f_0 , que é irradiada pela antena. Uma fração dessa radiação é refletida pelo alvo e outra vai em direção ao radar, onde é recebida pela antena. Se o alvo se encontrar em movimento, com uma velocidade v_r em relação ao radar, o sinal recebido encontrar-se-á deslocado nas frequências $\pm f_d$ relativamente a frequência central.

O sinal positivo associado a frequência Doppler ocorre quando o alvo se aproxima do radar. Se, pelo contrário, o alvo estiver se afastando do radar tem-se um sinal negativo.

O sinal de eco recebido na frequência $f_0 \pm f_d$ é conduzido pela antena em direção ao receptor, e é combinado com uma porção do sinal transmitido f_0 . O resultado da multiplicação destas duas senóides

corresponde a dois sinais, sendo uma seno da soma das frequências e ou outro o seno da diferença. O detector (mixer) só irá detectar o seno da diferença, correspondente à frequência Doppler. A Figura 2.4 mostra os possíveis espectros do sinal recebido.

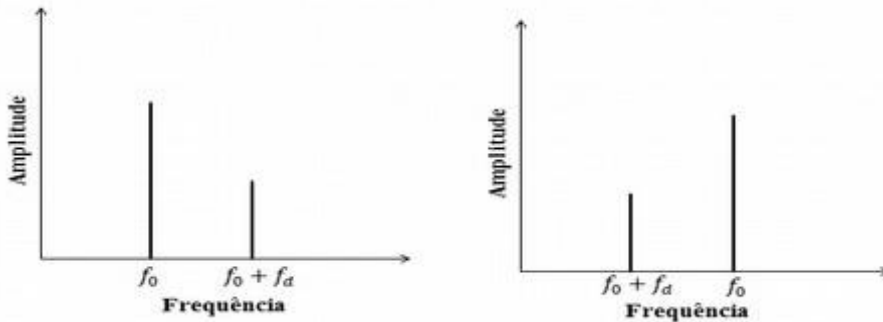


Figura 2.4: Possíveis espectros do sinal recebido

2.4 Radar de onda Contínua com Modulação de Frequência Linear

Os radares de onda contínua sem modulação são capazes de medir apenas a velocidade do alvo através do efeito Doppler. No entanto, para medir a posição do alvo é necessário que haja uma referência temporal no sinal transmitido pelo radar. Nos sistemas CW isso pode ser conseguido aplicando uma modulação em frequência no sinal transmitido. Embora existam diversas formas de modulação em frequência, tais como senoidal e não linear, é abordado neste trabalho apenas o caso linear.

No entanto, antes de falar do radar FMCW propriamente dito, apresenta-se uma breve revisão sobre o conceito de modulação em frequência, uma vez que esse conceito é de fundamental importância no entendimento do funcionamento do radar.

2.4.1 Modulação da portadora

A modulação é o processo pelo qual se tem opção de alterar algumas características de uma onda portadora, de conformidade com as informações a serem transmitidas. As características usuais modificadas pelo sinal são a fase da portadora (modulação em fase, comumente indicada pela sigla PM), a amplitude (modulação em amplitude ou AM) e a frequência (modulação em frequência, representada como FM). Este procedimento é utilizado para adequar a informação a um conjunto de exigências para melhor eficácia da transmissão.

Em radares FMCW, como citado anteriormente, utiliza-se a modulação em frequência e mantêm-se a amplitude constante. Nesta técnica, a frequência da portadora sofre alterações em função da amplitude de informação, referida genericamente como sinal modulante. Quando a amplitude da informação desse sinal varia, a frequência da portadora modifica-se em relação à frequência central. A frequência do sinal modulante f_m não altera a frequência da portadora, mas incide sobre o seu desvio de frequência β , no qual está contida a informação a ser transmitida. O desvio de frequência é dado por,

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} . \quad (2.4)$$

Ao se efetuar a análise da portadora modulada no domínio da frequência, suas componentes frequenciais estendem-se até o infinito, teoricamente. Os valores considerados são apenas aqueles com amplitudes significativas, a partir dos quais não há vantagens na inclusão dos outros. Quando o sinal é processado em maiores larguras de faixa, obtém-se maior fidelidade na recuperação da informação. [2,4]

O número de pares de faixas laterais (n) é dado por $n = \beta + 1$, sendo os valores superiores a n desconsiderados devido à potência ser insignificante. Dentro deste critério, a largura de faixa é obtida por:

$$BW = 2nf_m = 2(\Delta f + f_m) . \quad (2.5)$$

Como exemplo, admite-se um sinal descrito no tempo como $X_{AM} = A\cos(\theta(t))$, onde $\theta(t)$ é um argumento que inclui a influência do sinal modulante sobre a fase. É possível definir uma variação $F(t)$ que determina o argumento instantânea e que pode ser uma função linear, senoidal, entre outros. As variações da frequência instantânea e na fase correspondente obedecem a:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}, \text{ e} \quad (2.6)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt. \quad (2.7)$$

A frequência instantânea $f(t)$ é função da variação instantânea da fase de $F(t)$.

A utilização deste tipo de modulação em FMCW está relacionada com o espectro de frequência ocupado. Para maior distinção do sinal no domínio do tempo, o espectro do sinal transmitido deve ser amplo, informações colhidas com as análises no domínio da frequência, a partir do emprego das transformadas de Fourier. Como o desvio de frequência está relacionado à informação, quanto maior o seu valor em um dado intervalo de tempo, maior será a precisão de medida de tempo de trânsito e maior o espectro transmitido. A modulação em frequência facilita na identificação dos dados, em função da maior largura de faixa, bem como relaciona fatores importantes no processamento do sinal de retorno, como a diferença entre as frequências transmitida e recebida.

2.4.2 Formas de Ondas usados na modulação em frequência linear

As formas de ondas mais utilizadas na emissão de um radar de onda contínua modulado em frequência são as apresentadas a seguir:

a) Forma de onda “Dente-de-Serra”: A Figura 2.5 mostra o gráfico de frequência em função do tempo para a forma de onda conhecida como “Dente-de-Serra”.

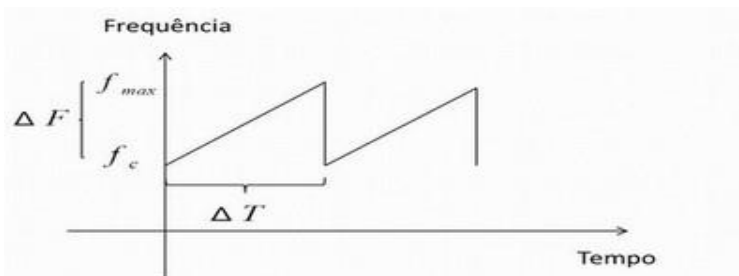


Figura 2.5: Forma de onda Dente de Serra

Ela é equacionada matematicamente da seguinte forma,

$$f = f_c + \frac{(f_{max}-f_c)}{(\Delta T)}t \text{ para } 0 \leq t \leq \Delta T . \quad (2.8)$$

O termo $\Delta F = f_{max} - f_c$ é conhecido como banda modulante do radar.

b) Forma de onda “Triangular”: A Figura 2.6 mostra o gráfico de frequência em função do tempo para a forma de onda conhecida como “Triangular”

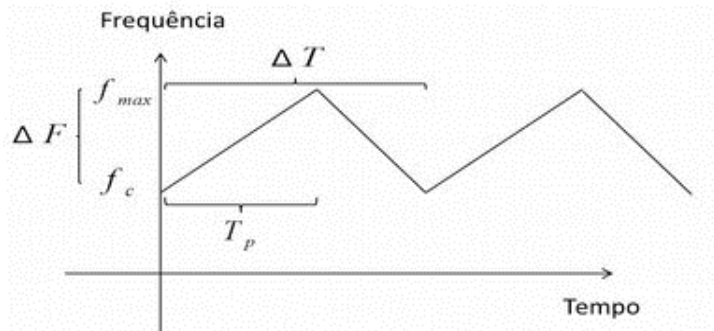


Figura 2.6: Forma de onda Triangular

A equação da forma de onda da Figura 2.6 é dada por,

$$f = f_c + \frac{(f_{max}-f_c)}{(T_p)}t \text{ para } 0 \leq t \leq T_p \text{ e } f = f_{max} + \frac{(f_{max}-f_c)}{(\Delta T-T_p)}t \text{ para } 0 \leq t \leq \Delta T - T_p. \quad (2.9)$$

Novamente, o termo $\Delta F = f_{max} - f_c$ é conhecido como banda modulante do radar CW.

De posse das formas de onda mais utilizadas por um radar de onda contínua, consegue-se calcular a velocidade e a posição de um objeto se movimentando em relação ao radar. Por simplicidade, é analisado primeiramente o caso de um alvo parado e em seguida apresenta-se os resultados para um alvo em movimento.

2.4.2 Estimação da posição e velocidade através de um radar FMCW

A Figura 2.7 a seguir mostra as formas onda transmitidas e recebidas pelo radar em função do tempo. Note que o alvo é tratado como sendo ideal, ou seja, despreza-se eventuais degradações no processo. A forma de onda usada nesse exemplo será a “Dente de Serra”, mas o processo é totalmente análogo se fosse usado a “Triangular”. O sinal de eco recebido vem de um alvo localizado a uma distância R do transmissor. A frequência de batimento, denominada f_b , é a diferença instantânea entre a frequência transmitida e a recebida ponto a ponto. A medição dessa frequência é de fundamental importância, pois é através dela que se consegue medir a distância do alvo, uma vez que ela é diretamente relacionada com o tempo de atraso; destaca-se de que nesse primeiro caso o alvo está parado.

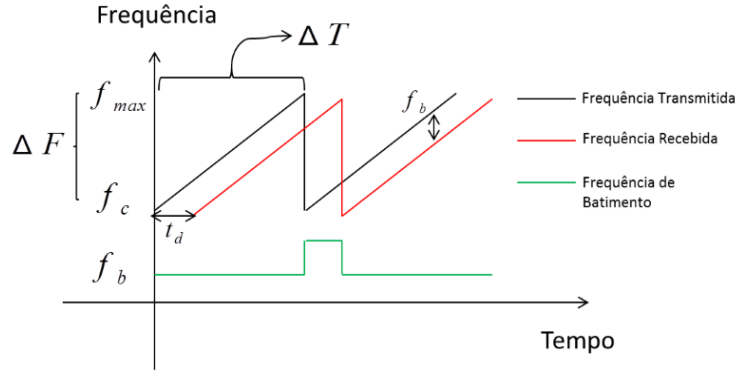


Figura 2.7: Frequências transmitidas e recebidas em função do tempo juntamente com o batimento.

Observando a Figura 2.7, pode-se calcular a frequência de batimentos f_b por uma semelhança de triângulos. Sabe-se que as formas de ondas estão deslocadas de um tempo t_d devido a distância percorrida entre o radar e o alvo; portanto,

$$f_b = \frac{\Delta F}{\Delta T} t_d, \quad (2.10)$$

onde f_b é a frequência de batimentos, t_d é o tempo de atraso entre os sinais devido a distância percorrida, ΔF é a banda de modulação e ΔT é o período.

O atraso entre os sinais, t_d , é calculado pela seguinte expressão,

$$t_d = \frac{2R}{c}, \quad (2.11)$$

onde R é a distância do alvo e c é a velocidade da luz no meio.

Substituindo (2.7) em (2.6), temos a expressão conhecida como equação do FMCW,

$$f_b = \frac{\Delta F}{\Delta T} \frac{2R}{c}. \quad (2.12)$$

Outras formulações para o FMCW podem ser construídas. Por exemplo, se o sinal enviado pelo radar tiver forma “Triangular” com o mesmo período de modulação usado anteriormente a equação do FMCW torna-se

$$f_b = \frac{\Delta F}{\Delta T} \frac{4R}{c}. \quad (2.13)$$

Para o caso do alvo em movimento, temos que recordar que o efeito Doppler irá mudar a frequência recebida do alvo em movimento, com velocidade V . Se a onda transmitida pelo radar for do tipo “Dente de Serra” dada pela Equação (2.8) torna-se

$$f_b = \frac{-\Delta F}{\Delta T} \frac{2R}{c} + \frac{2Vf_0}{c}. \quad (2.14)$$

A Equação (2.10) mostra que a frequência de batimentos nesse caso depende de dois parâmetros desconhecidos, R e V . Percebe-se que no caso do alvo em movimento a forma de onda enviada pelo transmissor não pode ser “Dente de Serra”. Nesse caso deve-se usar a forma de onda “Triangular”. Vale ressaltar, que o incremento devido à frequência Doppler f_d reduz o batimento na região de subida da onda triangular e aumenta o batimento na região de descida do sinal. Dessa forma,

$$f_b(\text{Subida}) = \frac{-4\Delta FR}{\Delta Tc} + \frac{2Vf_0}{c} , \quad (2.15)$$

e

$$f_b(\text{Descida}) = \frac{4\Delta FR}{\Delta Tc} + \frac{2Vf_0}{c} . \quad (2.16)$$

Portanto, R é dado por

$$R = \frac{\Delta Tc}{8\Delta F} (f_b(\text{Descida}) - f_b(\text{Subida})) , \quad (2.17)$$

e, V dado por,

$$V = \frac{c}{4f_0} (f_b(\text{Descida}) + f_b(\text{Subida})) . \quad (2.18)$$

Logo, para um único alvo em movimento têm-se duas incógnitas e duas equações e, portanto, um sistema possível e determinado.

2.4.3 Resolução de Distância

O radar FMCW apresenta uma alta resolução em distância, capaz de produzir medidas de alcance bastante precisas. Além disso, é possível usar um radar FMCW para simular um radar de abertura sintética (SAR) de modo a gerar uma alta resolução em duas dimensões.

O alcance do FMCW linear é limitado principalmente pela banda de transmissão, mas fatores como resolução em frequência e *overlap* das ondas transmitidas e recebidas diminuem a resolução em distância. Para qualquer forma de onda usada na transmissão do radar, a resolução de alcance é linearmente proporcional à resolução temporal e, portanto,

$$\Delta R_0 = \frac{c\Delta T}{2} = \frac{c}{2\Delta F} . \quad (2.19)$$

onde ΔR_0 é a resolução em distância, ΔT a resolução temporal e ΔF a banda de modulação.

3 Modelagem e simulações

O que foi apresentado nos capítulos anteriores nos diz que conhecida as formas de ondas das frequências emitidas e recebidas, pode-se calcular distância e velocidade do alvo. Vale ressaltar, no entanto, que o radar não enviar uma forma de onda daquela diretamente para o objeto. Na verdade, o sinal enviado é dado por um sinal senoidal com uma modulação e o objetivo final é, a partir da recepção desse sinal extrair as informações em termo de frequência para que se possa calcular a velocidade e a distância.

Serão analisados os procedimentos matemáticos para o tratamento do sinal recebido. O diagrama em blocos do radar FMCW é ilustrado na Figura 3.1, destacando-se as funções do radar propriamente dita e as do processamento do sinal.

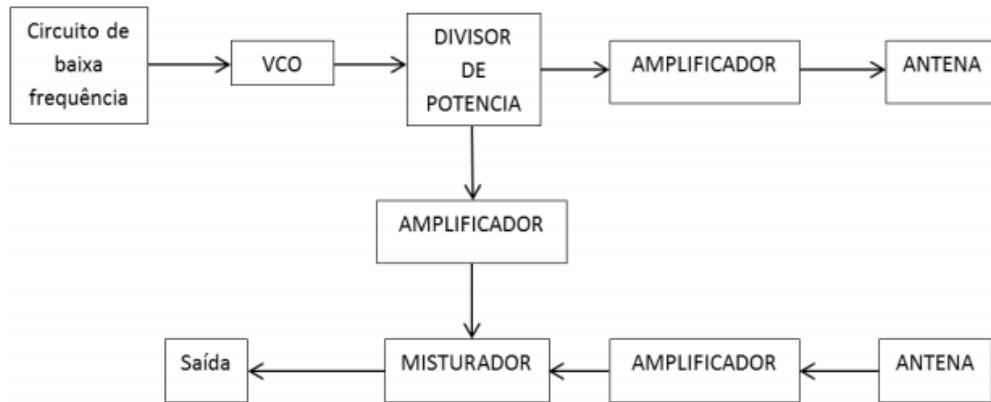


Figura 3.1: Diagrama de bloco de um radar FMCW.

Como visto a diferença entre as frequências de transmissão e recepção, em determinado tempo de propagação, permite obter a distância do objeto e a velocidade. Após o sinal de retorno passar pelo misturador, a resultante, descrita no domínio do tempo, é transformada para o domínio da frequência, segundo o tratamento clássico das transformadas de Fourier. Utilizam-se os algoritmos da transformada rápida (FFT), uma metodologia que agiliza a obtenção dos resultados. A componente de maior amplitude corresponde à frequência de batimento procurada, da qual se extrai a distância procurada.

3.1 Formas de onda enviadas e recebidas pelo transmissor

Um radar FMCW envia sinais de forma contínua, com uma certa modulação em frequência que nesse caso será da forma linear, como discutido nos capítulos anteriores. Além disso, por questões de simplicidade usa-se a forma de onda chamada “Dente-de-Serra” nos resultados abaixo, sem perda de generalidade nos resultados abaixo.

O sinal enviado pelo radar é conhecido como “CHIRP” e terá a seguinte forma,

$$x(t) = A \cos(2\pi f t), \quad (3.1)$$

$$f = f_c + \frac{(f_{\max} - f_c)}{(\Delta T)} t \text{ para } 0 \leq t \leq \Delta T. \quad (3.2)$$

Portanto,

$$x(t) = A \cos(2\pi f_c t + 2\pi \frac{(f_{max}-f_c)}{t_d} t^2). \quad (3.3)$$

onde A é uma constante proporcional a potência transmitida, f_c a frequência da portadora e t_d é o tempo de propagação.

A Figura 3.2 abaixo apresenta um sinal da forma (3.1) com $f_c = 2500$, $f_{max} = 5000$ Hz e $t_d = 1$ s.

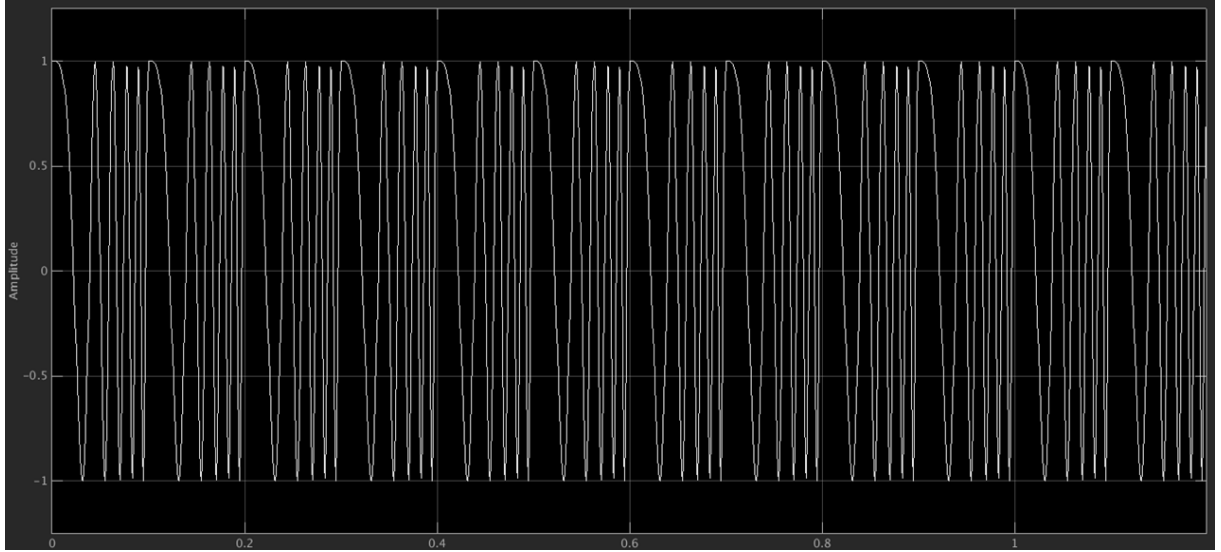


Figura 3.2: Simulação de um sinal enviado por um radar FMCW

Pode-se dizer que o sinal recebido é uma réplica do sinal enviado a menos de um deslocamento no tempo devido a distância entre o radar e o alvo. Logo,

$$r(t) = A \cos(2\pi f_c (t - t_d) + 2\pi \frac{(f_{max}-f_c)}{t_d} (t - t_d)^2) \quad (3.4)$$

3.1.1 Conversão do Sinal e filtragem do Sinal

Partindo do sinal recebido, pode-se extrair a informação desejada. Para isso, conforme mostrado na Figura 3.1, é necessário a utilização do misturador para se obter a diferença de frequência entre o sinal transmitido e o recebido [4].

Teoricamente, na saída desse circuito encontram-se diversas componentes, que incluem os sinais processados, seus harmônicos, componentes contínuas e termos resultantes da multiplicação dos sinais desenvolvidos em (3.4) e (3.5). A razão é que o misturador inclui elementos não lineares.

Para eliminar essas componentes indesejáveis do sinal emprega-se um filtro passa baixo logo após a saída do misturador.

Vale ressaltar, que na implementação do radar FMCW utilizou-se um filtro passa baixas como indicado na Figura 3.3.

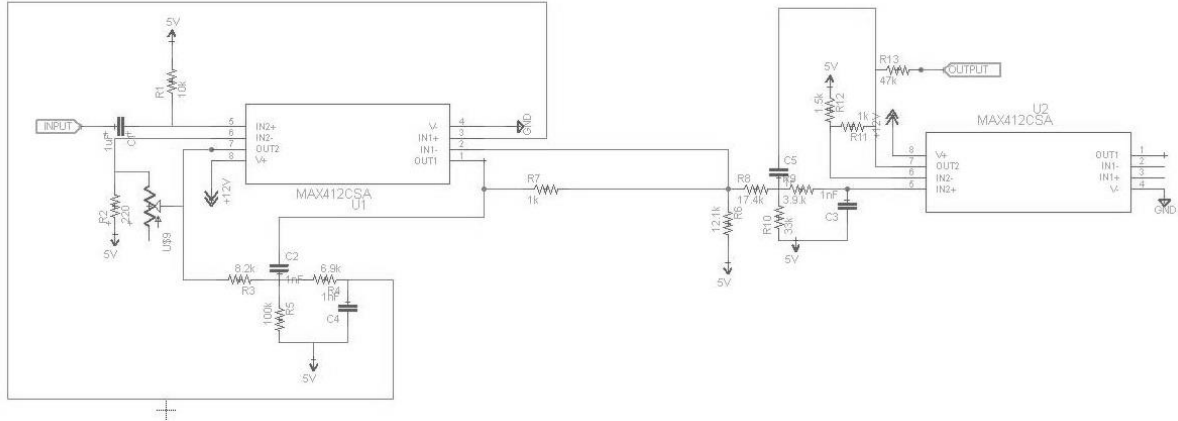


Figura 3.3: Filtro Passa baixo utilizado no projeto

O filtro mostrado tem um ganho teórico de 32 dB e frequência de corte de 22 KHz. No entanto, essa frequência é idealizada uma vez que a frequência de amostragem utilizada pelo radar será de 44 KHz, como mostrado nas próximas seções. O ganho de 32 dB foi escolhido de forma a termos uma amplitude de saída detectável.

O sinal resultante das operações descritas é dado por:

$$y(t) = A_1 \cos(2\pi \frac{(f_{max}-f_c)}{2\Delta T} t_d t + 2\pi(f_c \Delta T - \frac{(f_{max}-f_c)}{2\Delta T} t_d^2)). \quad (3.5)$$

Onde $y(t)$ é o sinal desejado após todo o tratamento. Da equação acima e recordando a definição física de batimentos verifica-se que a frequência de batimentos está de acordo com a equação (2.12)

3.2. Transformada rápida de Fourier (FFT)

A natureza impõe um caráter cíclico em muitos fenômenos físicos, surgindo desta forma a importância de funções periódicas na tarefa de explicar o mundo ao nosso redor. A essência da análise de Fourier consiste em representar o sinal como uma superposição de senóides, onde cada uma delas possui uma única informação, uma vez que são ortogonais entre si. Este tipo de caracterização fornece à possibilidade de representar os sinais de forma criteriosa tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, transformando desta forma a informação original para uma informação potencialmente mais útil.

O filtro por transformada rápida de Fourier consiste em aplicar a Transformada Discreta de Fourier (DFT) para se obter o espectro de frequências do sinal. Porém, a computação direta da DFT requer N^2 operações. Esse grande número de operações torna a DFT inviável de ser utilizada na maioria das aplicações práticas, sendo por essa razão utilizada a Transformada Rápida de Fourier (FFT), pois necessita de apenas $N \log_2 N$ operações, tornando-se muito mais rápida.

A essência do algoritmo da FFT está no fato de se poder realizar uma transformada discreta de Fourier em um conjunto de N pontos fazendo duas transformadas de $\frac{N}{2}$ pontos com poucas

mudanças nos dados originais, sendo que cada intervalo de $\frac{N}{2}$ pode ser dividido em dois novos intervalos com $\frac{N}{4}$ pontos, e assim por diante. Isso mostra a importância de N durante a amostragem de dados, sendo requerido que N seja uma potência de dois. Em alguns casos, se reduz a quantidade de dados ou se adiciona zeros ao conjunto, sendo que a adição de zeros é realizada automaticamente por algumas rotinas, o que altera os resultados esperados.

3.2.1 Formulação Matemática

Considere uma sequência de N pontos dados por $x[0], x[1], \dots, x[N-1]$, define-se a transformada discreta de Fourier (DFT) como,

$$X[K] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{nk} \text{ para } k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3.6)$$

onde $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$.

A Equação (3.6) mostra a transformação de um vetor de N pontos no domínio do tempo em um vetor de N pontos no domínio da frequência. Além disso, pode-se interpretar essa definição dada para a DFT como a frequência de amostragem da Transformada de Fourier de sinais discretos (DTFT).

Vale ressaltar, que o que chama-se de FFT nada mais é do que um algoritmo rápido para computar a DFT e não outra transformada. Em Matlab®, por exemplo, a função *fft(.)* é sempre usada para calcular a DFT. Portanto, é usual aceitar usar os termos DFT e FFT para definir os resultados computacionais provenientes da Equação (3.6).

3.3 Identificação do eco do sinal recebido

Através da informação na saída do filtro, processa-se o sinal para a obtenção dos parâmetros desejados. A escolha do método mais apropriado para identificar a informação depende das características do meio de propagação e das propriedades do radar. A ideia básica é que o método selecionado deve remover as interferências e extrair a envoltória do sinal, fornecendo resultados que evitem incertezas na frequência de batimento, fundamental para a localização do alvo.

Existe um método que detecta a distância através do processamento espectral do sinal. É baseado na utilização de uma técnica de limiar de detecção. A magnitude de cada amostra complexa do eco na saída do filtro é comparada com um limiar pré-estabelecido. Se o nível encontrado for abaixo deste limiar, supõe-se que seja interferência e não o sinal desejado. Caso contrário, considera-se a presença do alvo. Em suma, o detector faz a decisão entre a energia de cada amostra recebida. Este conceito de detecção tendo um limiar como referência pode ser aplicado para diferentes sistemas de processamento de sinal. Neste trabalho, o limiar é fixado em um valor conveniente para o alcance do equipamento. A figura 3.4 exemplifica a escolha de um limiar de decisão. Em sistemas práticos, as interferências raramente são conhecidas para uma fixação de limiar. Assim, são necessários ensaios em campo, para garantir a confiabilidade da medição.

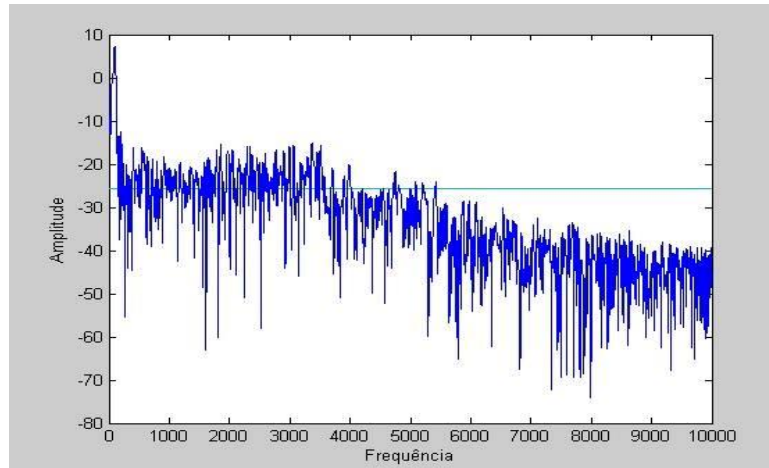


Figura 3.4: Espectro de frequência de um sinal de áudio e o limiar de corte escolhido

A análise espectral usando a FFT é muito útil para a observação de certas propriedades do sinal, bem como para extrair informações que possam não estar claras ou evidentes no domínio do tempo. No entanto, em alguns casos, a análise espectral não oferece resultados tão claros como se poderia esperar. Isso se deve a vários fatores, como curtos intervalos de observações e variações de comportamento do sinal durante o período de aquisição. Como trabalhou-se com a aquisição de um sinal real vindo de um radar estamos vulneráveis aos fatores citados acima. Para solucionar este problema usa-se uma técnica para suavizar o espectro que será apresentada na próxima seção.

3.4 Predição Linear

A predição linear consiste em usar amostras de um processo estocástico para fazer uma estimativa de outra amostra. Divide-se em dois tipos: predição para frente (*forward prediction*) e para trás (*backward prediction*). No primeiro, usam-se as M amostras passadas para prever a próxima, e no segundo, usam-se as M amostras presentes para prever a que vem antes delas. Para este trabalho será usada a predição para frente. A Figura 3.5 abaixo apresenta o diagrama de bloco para esse tipo de preditor.

Com base na Figura 3.5, percebe-se que o preditor linear para frente é composto por M entradas amostradas do processo em questão que são filtradas pelo coeficientes $w[1], w[2], \dots, w[m]$, os quais são otimizados de forma média quadrática. Dessa forma, o valor estimado de $x[n]$ é dado por,

$$\hat{x}[n] = \sum_{k=1}^M w[k]x[n-k] \quad (3.7)$$

O erro de predição é definido como,

$$f_m[n] = x[n] - \hat{x}[n] \quad (3.8)$$

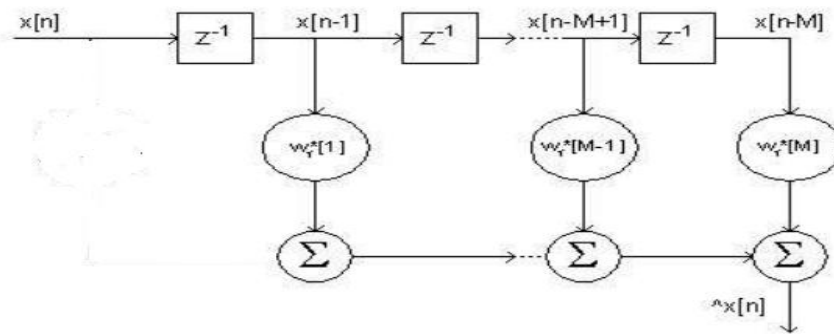


Figura 3.5: Diagrama de blocos de um preditor linear para frente.

Considerando o processo de entrada como $\vec{X} = (x[n-1], x[n-1], \dots, x[n-m])^T$, os coeficientes como $\vec{W} = (w[1], w[2], \dots, w[M])$, a correlação cruzada entre a entrada e a resposta desejada como $\vec{r} = E[\vec{X}[n-1]\hat{x}[n]]$ e $\vec{R} = E[\vec{X}[n]\vec{X}[n]^H]$ pode-se demonstrar usando o método dos mínimos quadráticos que:

$$\vec{R}\vec{W} = \vec{r} \quad (3.9)$$

Usando essa técnica o espectro apresentado na Figura 3.4 transforma-se no apresentado na Figura 3.6. Com ela fica mais fácil identifica os picos e, conseqüentemente, a frequência de batimentos [3].

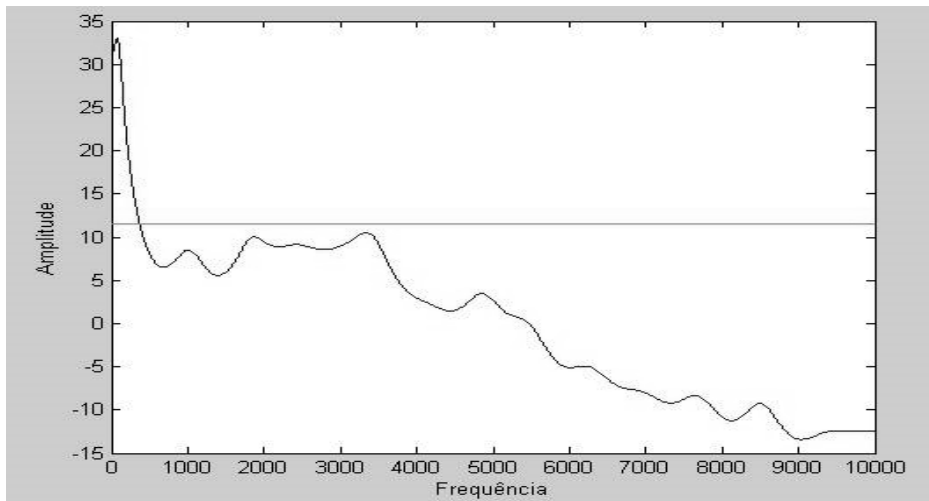


Figura 3.6: Espectro de frequência após a suavização via predição linear

Na próxima seção será apresentado o processamento do sinal feito usando o software LabView. A ideia é que o sistema seja capaz de processar o sinal em tempo real.

4 Processamento do Sinal em LabVIEW

Este capítulo mostra os resultados obtidos do processamento usando LabVIEW. Vale ressaltar que inicialmente o projeto tinha como finalidade o processamento em tempo real do sinal vindo de um radar FMCW de bancada. No entanto, não foi possível terminar a construção do radar em tempo hábil. Disto isso, o processamento foi feito a partir de sinais simulados, como exibido nas próximas seções.

Antes de apresentar os resultados obtidos vamos comentar um pouco a respeito da programação em LabVIEW já que se trata de uma forma de programar diferente do habitual.

4.1 Conceitos básicos sobre programação em LabVIEW

O LabVIEW é uma linguagem gráfica de programação que usa ícones em vez de linhas de texto para criar aplicações. Em contraste com as linguagens de programação baseadas em texto, onde as instruções determinam execução de programa, o LabVIEW usa programação onde o fluxo de dados (*dataflow*) determina a forma de execução.

A interface de operador é construída por um conjunto de ferramentas e objetos, sendo designada pelo painel frontal. O programa é efetuado usando representação gráfica de funções, para controlar os objetos do painel frontal.

O código fica definido num diagrama de blocos, que se pode associar a um fluxograma. Neste ambiente os programas são chamados instrumentos virtuais, ou VIs, por que sua aparência e operação imita instrumentos físicos, tal como osciloscópios e multímetros, por exemplo.

4.1.1 Principais componentes de um VI

Um VI contém essencialmente dois componentes: Painel frontal e Diagrama de blocos.

O painel frontal é a interface de operação do programa. Ele é construído com comandos e indicadores, que são a entrada com interação e terminais de produção do VI, respectivamente. Os comandos são comutadores, botões, discos e outros dispositivos de entrada. Já os indicadores são gráficos, LED's ou outros mostradores. A Figura 3.7 exemplifica o painel frontal.

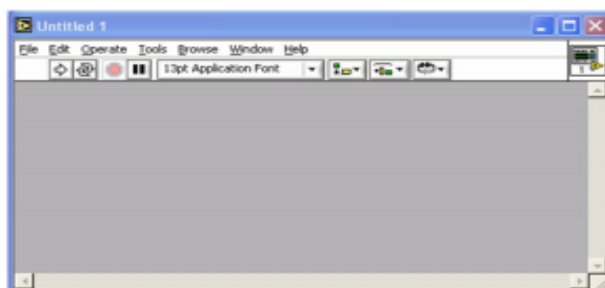


Figura 3.7: Painel frontal

Depois de definir o painel frontal, adiciona-se código usando representações gráficas de funções para controlar os objetos no painel. O diagrama de bloco contém este código gráfico de fonte. Os objetos de painel aparecem como terminais no diagrama de bloco. A Figura 3.8

exemplifica um diagrama de blocos.

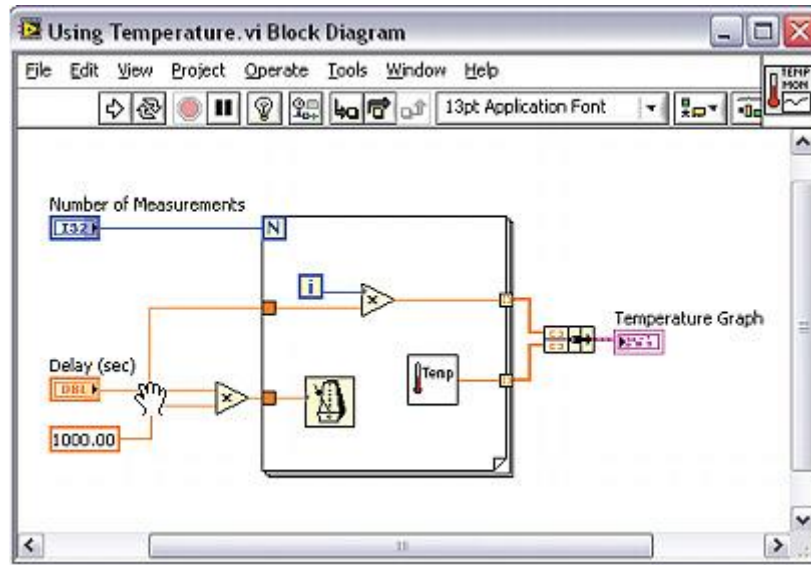


Figura 3.8: Exemplo de diagrama de blocos

As diferentes funções são unidas por meio de linhas por onde se comunicam os dados. Na Figura 3.9 apresenta-se um exemplo de comandos e indicadores.

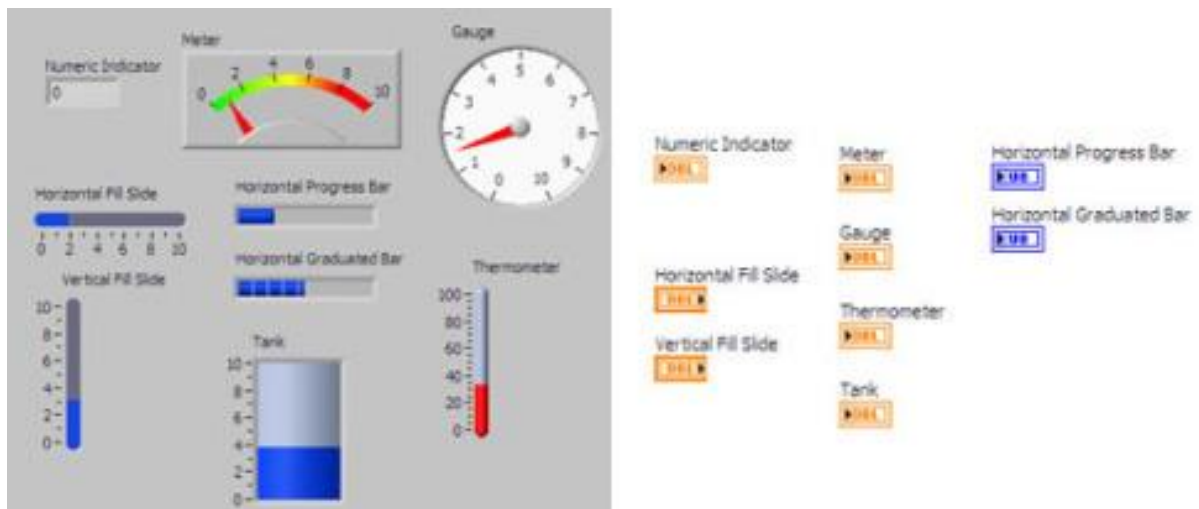


Figura 3.9: Exemplo de comandos e indicadores

4.1.2 Programação do fluxo de dados *Dataflow*

O LabVIEW segue um modelo de fluxo de dados para executar VI's. Um nó no diagrama de bloco é executado quando todas as suas entradas estão disponíveis. Quando um nó completa a execução, fornece dados a seus terminais de saída e passa-os ao próximo nó no caminho do fluxo.

Depois de construir um VI e criar seu ícone e ligações, este pode ser usado em outro VI. Um VI chamado do diagrama de bloco de outro VI é designado como subVI. Um SubVI

corresponde a uma sub-rotina em linguagens baseadas em texto.

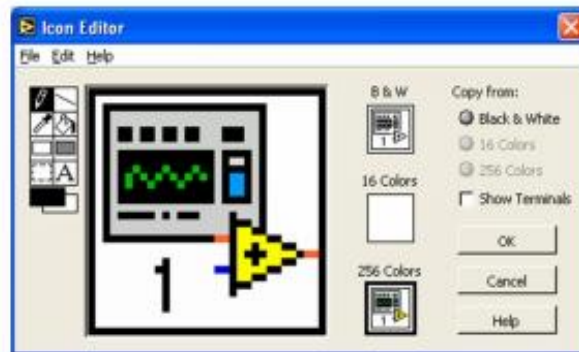


Figura 3.10: Definição de um ícone

Cada VI exibe um ícone no canto superior direito do painel frontal e janelas do diagrama de bloco. Um ícone é uma representação gráfica de um VI. Pode conter textos, imagens, ou uma combinação de ambos. A Figura 3.10 mostra a definição de um ícone.

O ícone de defeito contém um número que indica quantos novos VI's abriram-se desde que iniciou o LabVIEW. Crie ícones novos para substituir o ícone de defeito clicando o ícone no canto superior direito do painel frontal ou diagrama de bloco e selecione Edit Icon 1.6 do menu de atalho ou dando um clique duplo no ícone do canto superior direito do painel.

Além disso, para a aquisição de dados foi usando o NI myRIO da National Instruments. Na seção seguinte vamos apresentar algumas características desse aparelho e como ele foi usado no projeto.

4.2 Dispositivo de hardware embarcado NI myRIO

O NI myRIO é um dispositivo de hardware embarcado desenvolvidos para que estudantes de engenharia consigam desenvolver sistemas complexos de engenharia de forma rápida e simples.

O NI myRIO traz a tecnologia de system-on-a-chip (SoC) inteiramente programável, que combina um processador dual-core ARM Cortex – A9 e um *field-programmable gate array* (FPGA) com 28.000 células lógicas programáveis.

Usando o ambiente gráfico de programação do LabVIEW, estudantes conseguem programar o FPGA e expandir os seus sistemas em tempo real. Pode-se dizer que o ambiente de programação do LabVIEW deixou a programação do FPGA mais acessível, por ser uma linguagem de alto nível e de mais fácil assimilação do que as linguagens de máquina.

A Figura 3.11 mostra uma possível forma de mapeamento do LabVIEW para o FPGA.

Mapping LabVIEW to an FPGA

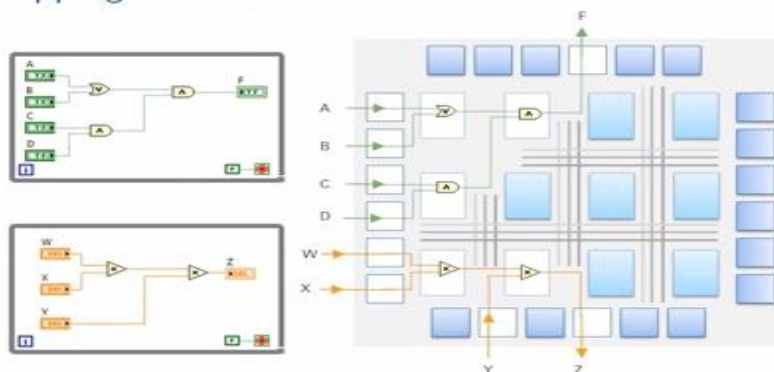


Figura 3.11: Mapeamento do LabVIEW para o FPGA

A programação do NI myRIO consiste em duas etapas. A primeira é a programação do bloco de FPGA, que se dá como necessária na produção de um código que necessite de aquisição de dados e processamento em tempo real. No caso do código criado a entrada usada foi um sinal de áudio que possui dois canais como ilustrado na Figura 3.12. Já a segunda parte é a programação na arquitetura ARM amplamente difundida.

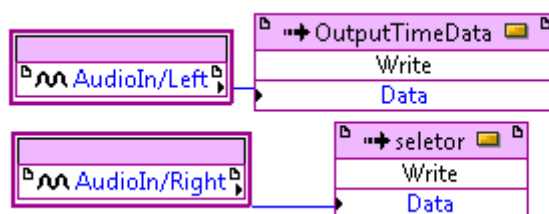


Figura 3.12: Sinal de áudio com duas entradas

No bloco FPGA criou-se três blocos de memória. Uma para armazenamento do sinal do radar e as outras duas para o armazenamento das partes reais e imaginárias provenientes de um pré-processamento do sinal amostrado. Destaca-se a importância do pré-processamento, pois ele é fundamental para que o sinal seja processado em tempo real. A Figura 3.13 exemplifica o processo.

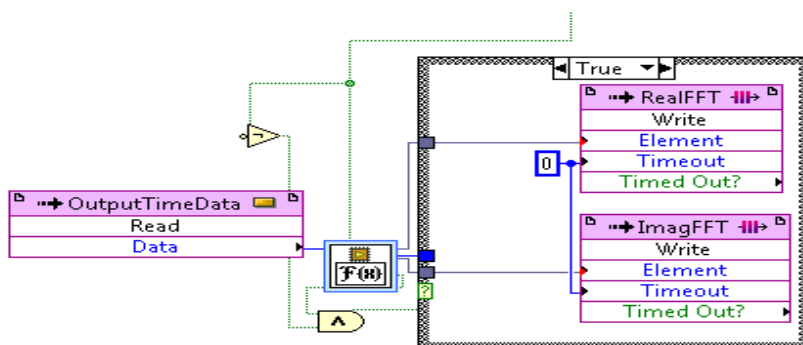


Figura 3.13: Blocos de memórias utilizados no FPGA

Após a programação é necessário utilizar um compilador para transformar o código em VHDL.

Nesse processo é gerado um arquivo chamado “bitfile” e o processo é finalizado passando-se a programar normalmente no ambiente do LabVIEW. Vale ressaltar que o tempo de compilação para gerar o “bitfile” é extremamente alto.

O NI myRIO também possui dez entradas analógicas, seis saídas analógicas, canais E/S de áudio e até 40 linhas de E/S digitais. Ele contém WI-FI integrado, um acelerômetro triaxial e vários LEDs programáveis. A Figura 3.14 mostra o dispositivo utilizado no projeto.

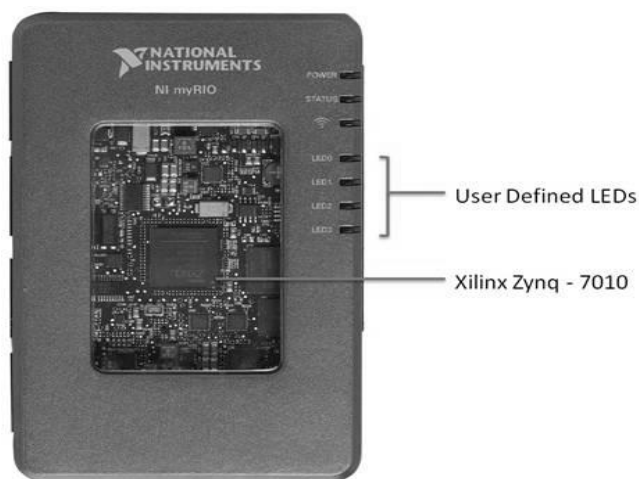


Figura 3.14: Ni myRIO utilizado no projeto

Vale ainda mencionar que na amostragem para uma dada frequência os dados são colocados em uma pilha *first in first out* (FIFO). Neste projeto utilizou-se uma pilha com 1024 posições e a FFT foi sendo calculada ponto a ponto diretamente no bloco do FPGA. A Figura 3.15 mostra como o FPGA foi utilizado no projeto.

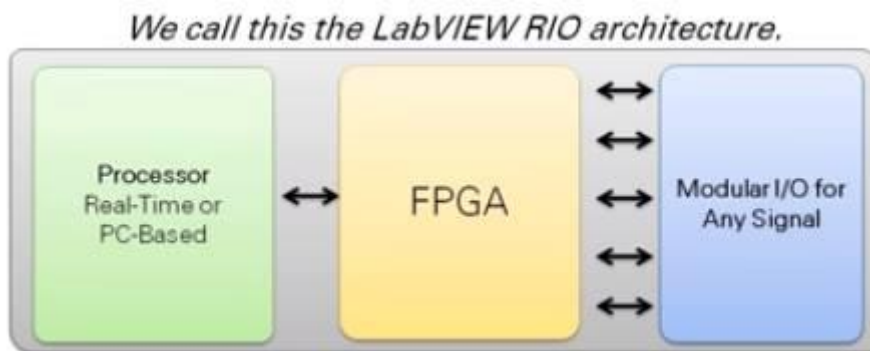


Figura 3.15: Esquemático da utilização do FPGA no processamento real do sinal

4.3 Sistema completo

O sistema completo implementado em LabVIEW pode ser visto na Figura 3.16. O bloco que

contém o processamento do sinal permite introduzir os dados necessários para a configuração do mesmo: tamanho da FFT, e limiar do sinal para a detecção de alvos. O processamento é feito para sinais digitais com frequência de amostragem de 44 KHz.

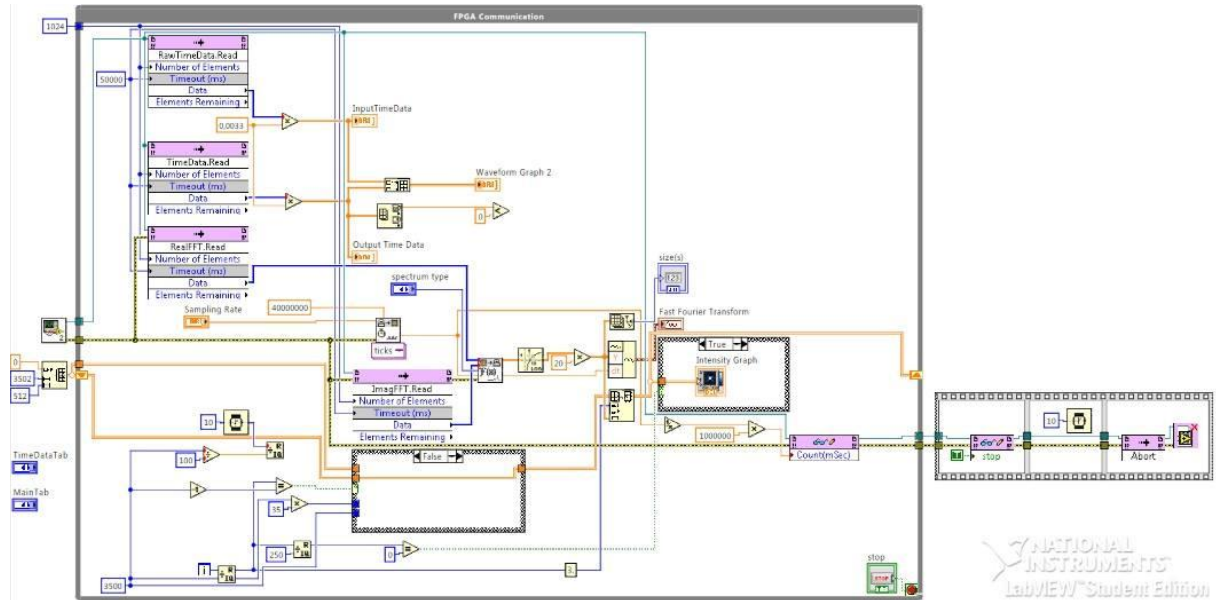


Figura 3.16: Diagrama completo do projeto

4.4 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos do processamento de um sinal de áudio simulado se movendo com velocidade constante.

Como não se tinha um radar físico criamos sinais simulados para testar a acurácia do sistema desenvolvido. Para tal criou-se um sinal de áudio proveniente de um móvel com uma velocidade constante de 4 m/s. A distância percorrida pelo corpo em função do tempo está apresentada na Figura 3.17.

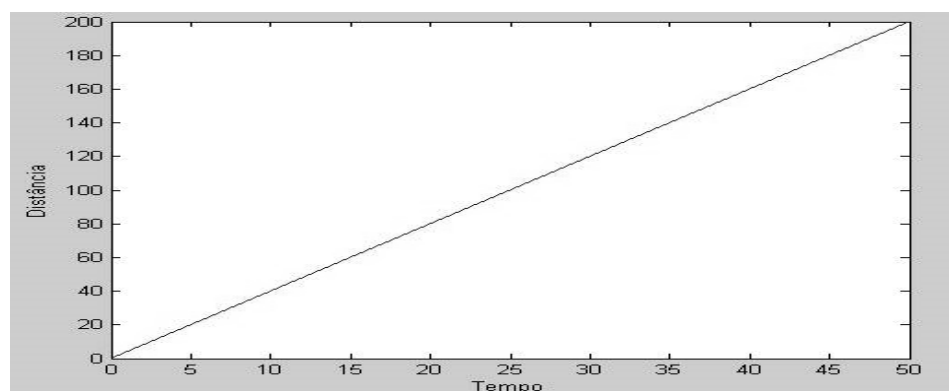


Figura 3.17: Trajetória de um móvel se movendo com 4 m/s

O resultado apresentando após processamento do sinal sem utilizar a suavização da curva apresentado na seção 3.4 está ilustrado na Figura 3.18.

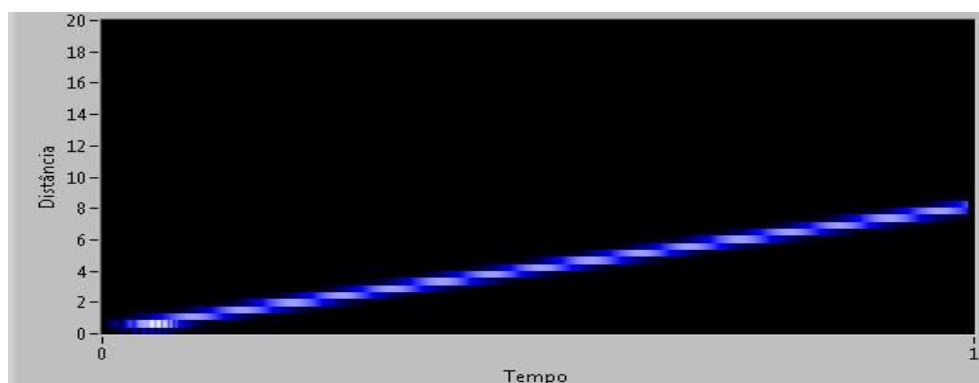


Figura 3.18: Resultado após o processamento do sinal

Vale ressaltar que para essa simulação não levou-se em conta a equação do radar, i.e, supõe-se que não existe dissipação de potência. Note que o resultado está de acordo com o que se esperava, mas ainda há certa incerteza sobre as posições ao longo do tempo devido a grossura da linha na saída.

Usando agora a técnica da suavização e ainda considerando que não há perdas obteve-se o resultado indicado na Figura 3.19.

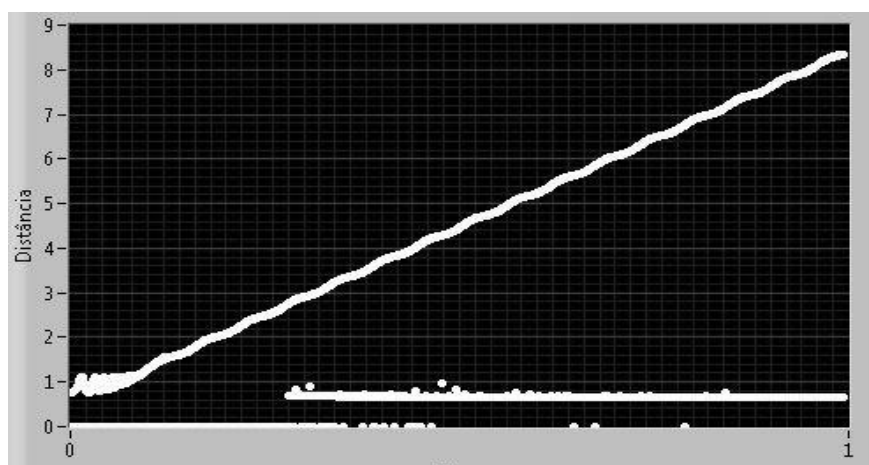


Figura 3.19: Resultado após a suavização

Note que dessa forma, os resultados ficam mais claros e próximos dos resultados esperados. Considerando agora que a potência emitida pelo radar cai com a quarta potência da distância de acordo com a equação (2.1) ao alvo têm-se algumas mudanças nos espectros.

A Figura 3.20 apresenta os resultados sem a suavização. Observe que a potência inicial é alta e vai caindo rapidamente a medida que o móvel se afasta do radar, o que está de acordo com a Equação (2.1).

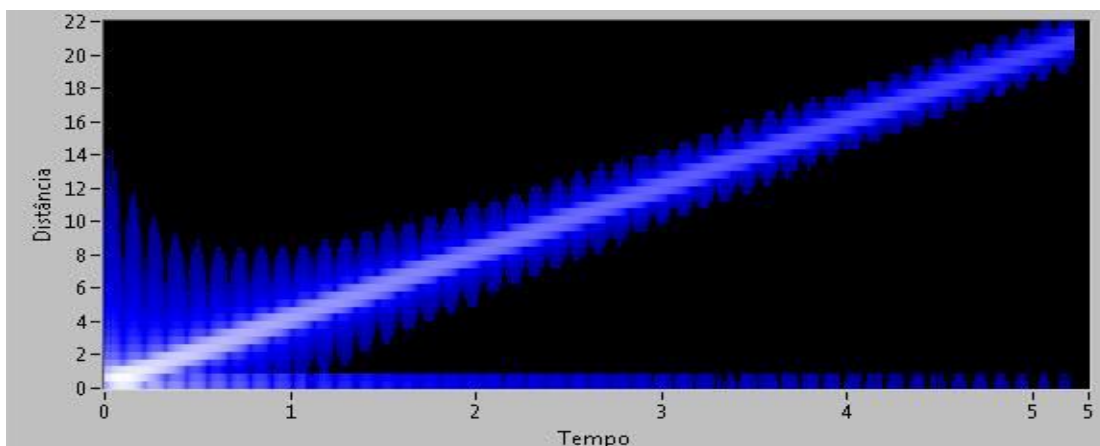


Figura 3.20: Resultado do processamento considerando a potência dissipada

O resultado após a suavização é apresentado na Figura 3.21. Nela fica claro que depois de 20 m a potência fica tão pequena que o radar não consegue mais detectar alvo.

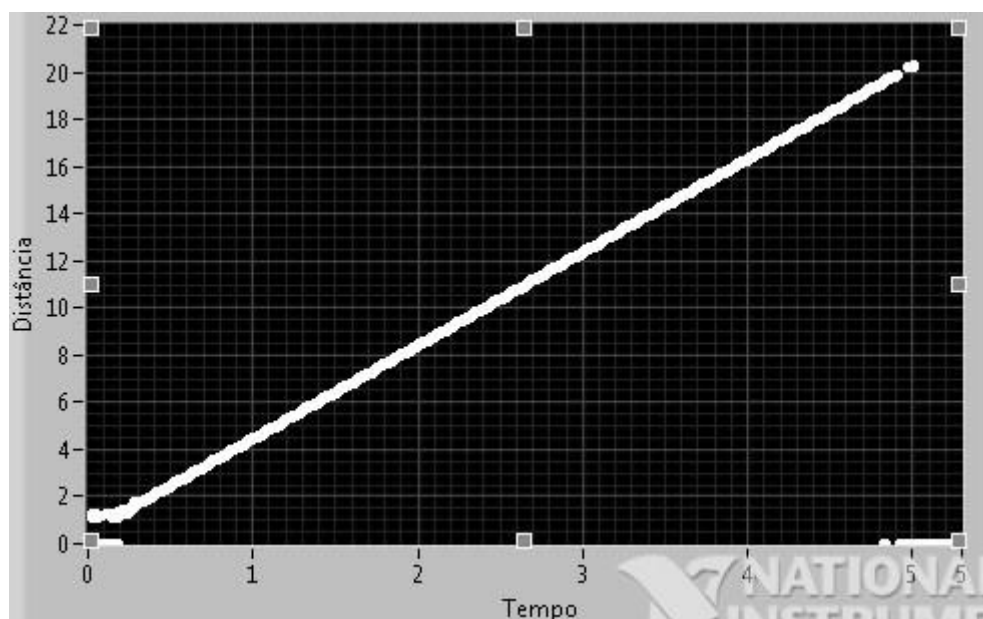


Figura 3.21: Resultado do processamento após o uso da suavização e considerando a potência dissipada

Além do sinal simulado, fizemos o processamento de um sinal real disponibilizado na internet de dois objetos em movimento. Para essa situação a trajetória descrita não ficou tão evidente quanto a do sinal simulado. O que pode se explicado, muito provavelmente, pela baixa potência do radar e pelos ruídos do ambiente externo. A Figura 3.22 mostrar os resultados obtidos.

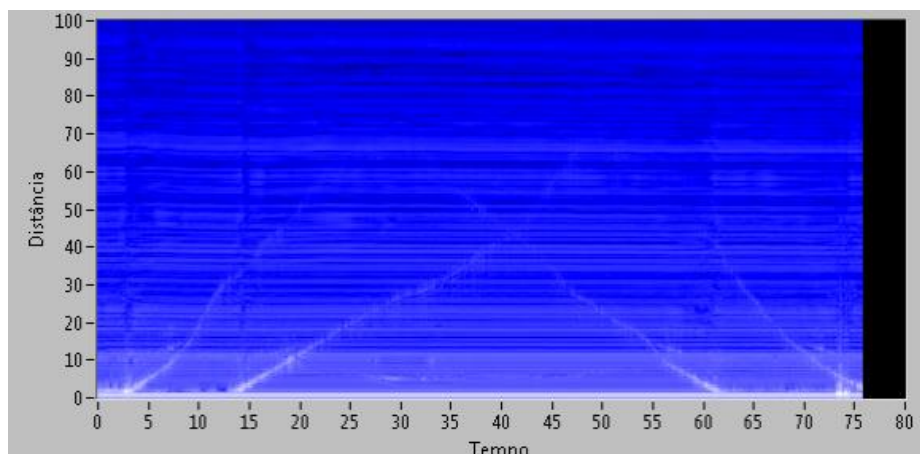


Figura 3.22: Resultado do processamento após o uso da suavização e considerando a potência dissipada

Observe que independentemente da situação, de se considerar ou não a equação do radar, os resultados se mostram satisfatórios para o sinal simulado. Lembrando que o ideal era ter o sinal proveniente do radar físico para que o processamento fosse feito em tempo real. Com ele também seria possível escolher um limiar de detecção mais apropriado, uma vez que permitirá fazer o treinamento do sinal e ver o nível de ruído introduzido pelo radar. Os resultados para um sinal real também se mostraram válidos, mas percebeu-se que é necessário ajustes nos algoritmos para uma melhor detecção da trajetória.

Opcionalmente é possível criar um painel iterativo no LabVIEW de acordo com o que se deseja (um velocímetro, acelerômetro) sem alterar o código já construído ou fazer alguma mudança. É uma questão de como os dados serão mostrados para o usuário.

5 Conclusões

Este projeto possibilitou um grande aprendizado a respeito de processamento de sinais e radares FMCW.

Primeiramente, foram levantadas os fatores que motivaram o estudo dos radares ao longo dos anos. Apesar de ter seus princípios básicos demonstrados em 1886 foi somente na década de 1930 que se deu o impulso no desenvolvimento dos radares.

Posteriormente, foi realizado um estudo mais detalhado sobre os principais tipos de radares. A ênfase foi dada no radar de onda contínua com modulação em frequência, por ser o objeto de estudo desse trabalho. Estudou-se os principais parâmetros associados a ele, o motivo da escolha da modulação linear e como se calcula a velocidade e posição de um alvo.

Em seguida, estudaram-se alguns conceitos de processamento digital de sinais para que pudéssemos extrair da melhor forma possível os parâmetros necessários para o cálculo da distância e velocidade do alvo. Os principais conceitos estudados foram Transformada Rápida de Fourier e predição linear.

Além disso, foi necessário aprender a programar em LabVIEW para fazer o processamento do sinal em tempo real. O LabVIEW é uma linguagem gráfica de programação que usa ícones em vez de linhas de texto para criar aplicações. Em contraste com as linguagens de programação baseadas em texto, onde as instruções determinam execução de programa. Além disso, foi necessário o uso do NI myRIO na aquisição de dados para o processamento.

Por fim, os resultados do processamento se mostraram satisfatórios, estando de acordo com o esperado. Para trabalhos futuros, sugere-se que seja feito o processamento usando sinais reais, oriundos de um radar real, para testar a robustez do código implementado neste trabalho. Com isso será possível, por exemplo, aprimorar a escolha do limiar teórico escolhido e testar a influência do ruído nos resultados.

6 Referências Bibliográficas

- [1]RIDENOUR, N. Louis, Radar System Engineering, McGraw Hill, 1947
- [2]SKOLNIK, I. Merril, Introduction to radar System, McGraw Hill, 1970
- [3]OPPEHEIM, A. V.S. WILLISKY e S.H. NAWAB, Signal and Systems, second edition, Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997
- [4]LATHI, B.P; Sinais e Sistemas lineares; Bookman; 2007
- [5]CARNEIRO, IZABELLA. Proposta para melhoria da resolução em radares FMCW utilizados na medição de nível. Agosto 2010.
- [6]BARTON David e SERGEY A. Leonov, *Radar Technology Encyclopedia*, Artech House, Inc – Boston, London. 1997.
- [7] Informações sobre o LabVIEW e o NI myRIO: <http://brasil.ni.com/> . Acessando em 26/06/2015