



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**ELÉTRICA**

**Sensor de nível por micro-ondas e tecnologia**  
**RADAR-FMCW**

**João Mario Mendes de Freitas**

Itajubá, Março de 2013



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**ELÉTRICA**

**Sensor de nível por micro-ondas e tecnologia**  
**RADAR-FMCW**

**João Mario Mendes de Freitas**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação e Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni

Itajubá, Março de 2013



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**ELÉTRICA**

**João Mario Mendes de Freitas**

**Sensor de nível por micro-ondas e tecnologia**  
**RADAR-FMCW**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 27 de  
Março de 2013, conferindo ao autor o título de **Mestre**  
**em Ciências em Engenharia Elétrica.**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni (orientador)

Prof. Dr. Yvo Marcelo Chiaradia

Prof. Dr. José Antonio Justino Ribeiro

Prof. Dr. Paulo César Crepaldi

Itajubá, Março de 2013

A querida Lucimara minha esposa  
e meus filhos João Paulo e Luís  
Filipe pelo apoio, compreensão no  
tempo em que foi dedicado a este  
trabalho mais um passo importante  
de minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus familiares pelo incentivo e apoio durante este período dedicado a este trabalho.

Aos professores e amigos, Edson da Costa Bortoni e Prof. Dr. José Antônio Justino Ribeiro, que dedicaram sua atenção durante a orientação, compartilhando suas experiências, contribuindo com minha formação profissional e pessoal.

À Universidade Federal de Itajubá e aos amigos do EXCEN pela paciência e apoio durante a realização deste trabalho.

Aos colegas e amigos pelo apoio, paciência e contribuição durante o tempo dedicado às pesquisas.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de medidor de nível para tanques e silos que utiliza a tecnologia radar na faixa de micro-ondas de 2,5 GHz modulado em frequência FMCW, para melhor entendimento quanto ao funcionamento dos dispositivos comerciais semelhantes. O equipamento foi desenvolvido a partir do estudo das características relacionadas à modulação, amplificação, transmissão, recepção, demodulação, com o objetivo de se conhecer mais profundamente a propagação das ondas eletromagnéticas na faixa de micro-ondas e a influência do meio para o seu funcionamento. Aborda-se a evolução histórica da tecnologia do radar aplicada aos sensores de nível, apresentando dispositivos semelhantes permitindo a visualização das vantagens na medida de nível em cada um deles. O trabalho também descreve a importância da aplicação deste dispositivo em silos, tanques e/ou processos industriais onde a medição deve ser sem contato físico com o produto, observando as exigências de cada meio de propagação. É apresentado o desenvolvimento teórico, com as características de cada módulo do sensor. O desempenho dos módulos do protótipo foi avaliado comparando valores previamente calculados com dados obtidos através de testes práticos em laboratório.

Palavras-chave: sensores de nível, propriedades eletromagnéticas, fundamentos do radar, radar FMCW, modulação em frequência, medidor de nível sem contato.

## **ABSTRACT**

This work presents the development of a applied level meter prototype for tanks and silos that uses RADAR technology in the range of microwave, 2.5 GHz frequency modulated (FMCW), in order to reach a better understanding of the operation of similar commercial devices. Developed from the study of characteristics related to modulation, amplification, transmission, reception, and demodulation, aiming at a deeper of the behavior of the propagation of electromagnetic waves in the microwave range, as long as the influence of the environment for its operation. The work addresses the historical evolution of technology applied to RADAR level sensors, presenting similar devices allowing visualization of the extent of level measurements in each one benefits . It's also evaluated the importance of the application of this device in silos, tanks and industrial processes, where contactless measurements is a must not have meeting the requirements of each propagation medium. Theoretical and practical characteristics of each sensor module, are presented the performance of the prototype was assessed by comparing calculated values with previously obtained data from practical tests in the laboratory.

**Key words:** Level Meters, electromagnetic properties, fundamentals of radar, FMCW radar, frequency modulation, method of detection.

## **SUMÁRIO**

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>                                       | <b>13</b> |
| <b>LISTA DE TABELA .....</b>                                       | <b>17</b> |
| <b>LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS .....</b>                       | <b>18</b> |
| <b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>                               | <b>26</b> |
| <b>1.1 Contextualização do Problema .....</b>                      | <b>26</b> |
| <b>1.2 Desenvolvimento histórico .....</b>                         | <b>26</b> |
| <b>CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>                      | <b>32</b> |
| <b>2.1 Eletromagnetismo .....</b>                                  | <b>32</b> |
| 2.1.1 Permeabilidade Magnética do meio .....                       | 33        |
| 2.1.2 Constante dielétrica ou Permissividade relativa ao meio..... | 33        |
| 2.1.3 Condutividade elétrica .....                                 | 36        |
| 2.1.4 Espalhamento das Ondas Eletromagnéticas.....                 | 37        |
| 2.1.5 Absorção e Atenuação.....                                    | 38        |



|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.1.6 Reflexão das Ondas Eletromagnéticas .....                     | 38        |
| 2.1.7 Refração das Ondas Eletromagnéticas .....                     | 40        |
| 2.1.8 Difração.....                                                 | 41        |
| <b>2.2 Micro-ondas.....</b>                                         | <b>41</b> |
| 2.2.1 Espectro de frequência .....                                  | 42        |
| 2.2.2 Influência do meio na propagação das micro-ondas .....        | 44        |
| 2.2.2.1 Condutividade do meio de propagação .....                   | 45        |
| 2.2.2.2 Influência da unidade da propagação das micro-ondas .....   | 46        |
| 2.2.2.3 Influência de partículas suspensas .....                    | 46        |
| 2.2.2.4 Influência da temperatura .....                             | 47        |
| 2.2.2.5 Influência da pressão .....                                 | 47        |
| 2.2.3 Princípio de funcionamento do RADAR .....                     | 48        |
| 2.2.3.1 Equação do RADAR .....                                      | 49        |
| <br><b>CAPÍTULO 3 – SENSORES DE NÍVEL .....</b>                     | <b>51</b> |
| <br><b>3.1 Definição e características gerais dos sensores.....</b> | <b>51</b> |
| <br><b>3.2 Medição de nível.....</b>                                | <b>51</b> |
| 3.2.1 Sensores de nível sem contato .....                           | 54        |
| 3.2.1.1 Sensor de nível por ultrassom .....                         | 55        |

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1.2 Sensor de nível por Laser .....                              | 58 |
| 3.2.1.3 Sensor de nível por micro-ondas. ....                        | 60 |
| 3.2.1.3.1 Radares de onda pulsada .....                              | 61 |
| 3.2.1.3.2 RADAR de onda contínua modulado em frequência (FMCW) ..... | 63 |

## **CAPÍTULO 4 – SENSOR DE NÍVEL POR RADAR FMCW EM MICRO-ONDAS.** .....67

### **4.1 Sensor com antena única.....67**

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| 4.1.1 Componentes de um sistema de micro-ondas ..... | 68 |
| 4.1.1.1 Antena .....                                 | 68 |
| 4.1.1.2 Circulador de micro-ondas.....               | 71 |
| 4.1.1.3 Isolador.....                                | 71 |
| 4.1.1.4 Oscilador de portadora .....                 | 72 |
| 4.1.1.5 Gerador de onda dente de serra.....          | 73 |
| 4.1.1.6 Modulador em frequência .....                | 73 |
| 4.1.1.7 Amplificador sintonizado.....                | 73 |
| 4.1.1.8 Misturador.....                              | 74 |
| 4.1.1.9 Filtro.....                                  | 75 |
| 4.1.1.9.1 Perda de inserção .....                    | 75 |

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.2 Sensor com duas antenas.....</b>                                   | <b>76</b> |
| <br><b>CAPÍTULO 5 – DESENVOLVIMENTO E TESTES DO PROTÓTIPO.....</b>        | <b>78</b> |
| <b>5.1 Desenvolvimento do protótipo .....</b>                             | <b>78</b> |
| <b>5.2 Descrição do funcionamento .....</b>                               | <b>79</b> |
| 5.2.1 Fonte de alimentação.....                                           | 79        |
| 5.2.2 Sistema de transmissão .....                                        | 80        |
| 5.2.3 Sistema de recepção .....                                           | 83        |
| <b>5.3 Cálculo e confecção das antenas de recepção e transmissão.....</b> | <b>84</b> |
| 5.3.1 Diagrama de irradiação da antena de recepção .....                  | 84        |
| 5.3.2 Diagrama de irradiação da antena de transmissão .....               | 85        |
| 5.3.3 Cálculo do dipolo .....                                             | 86        |
| 5.3.4 Cálculo do ganho da antena parabólica.....                          | 87        |
| 5.3.5 Cálculo da largura de feixe .....                                   | 88        |
| <b>5.4 Módulo do oscilador de portadora .....</b>                         | <b>88</b> |
| <b>5.5 Comparador detector de fase e frequência.....</b>                  | <b>88</b> |
| <b>5.6 Testes de reflexão da portadora sem modulação .....</b>            | <b>89</b> |
| 5.6.1 No espaço livre com reflexão no concreto .....                      | 89        |
| <b>5.7 Módulo gerador do sinal modulante .....</b>                        | <b>90</b> |

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.8 Cálculo da distância entre o sensor e superfície medida .....                 | 92  |
| 5.9 Cálculo do nível de sinal incidente no meio de reflexão .....                 | 94  |
| 5.10 Cálculo do diâmetro da área de projeção do sinal na superfície.....          | 94  |
| 5.11 Cálculo do nível de recepção do sinal entregue ao amplificador de entrada .. | 96  |
| <br>                                                                              |     |
| CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....                                     | 97  |
| <br>                                                                              |     |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                  | 101 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.1</b> – Conjunto de dispositivos que compõe uma sonda mecânica .....                                           | 29 |
| <b>Figura 1.2</b> – Sensor RADAR FMCW .....                                                                                | 29 |
| <b>Figura 2.1</b> – Propagação do campo eletromagnético e do campo elétrico em direção a Z, de um sistema dextrogiro ..... | 32 |
| <b>Figura 2.2</b> – Atenuação da Onda Eletromagnética .....                                                                | 38 |
| <b>Figura 2.3</b> – Reflexão da Onda Eletromagnética em uma superfície plana .....                                         | 39 |
| <b>Figura 2.4</b> – Reflexão e Refração das Ondas .....                                                                    | 40 |
| <b>Figura 2.5</b> – Difração de Ondas Eletromagnéticas .....                                                               | 41 |
| <b>Figura 2.6</b> – Espectro de frequência .....                                                                           | 43 |
| <b>Figura 2.7</b> – Curva representativa do desvanecimento plano .....                                                     | 45 |
| <b>Figura 2.8</b> – Curva representativa do desvanecimento seletivo .....                                                  | 45 |
| <b>Figura 2.9</b> – Dependência da potência do sinal de RADAR refletido com a constante dielétrica .....                   | 46 |
| <b>Figura 2.10</b> – Gráfico do erro de leitura devido ao aumento da temperatura .....                                     | 47 |
| <b>Figura 2.11</b> – Erro devido ao aumento da pressão .....                                                               | 48 |
| <b>Figura 2.12</b> – Princípio do RADAR monoestático .....                                                                 | 48 |
| <b>Figura 2.13</b> – Princípio do RADAR biestático .....                                                                   | 49 |
| <b>Figura 3.1</b> – Pesquisa sobre utilização futura de transmissores em controle de processo ..                           | 52 |

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 3.2</b> – Medida de nível com boias internas em contato com o produto .....                                                          | 53 |
| <b>Figura 3.3</b> – Medida com sensores de presença sem contato físico .....                                                                   | 54 |
| <b>Figura 3.4</b> – Funcionamento do sensor ultrassônico .....                                                                                 | 56 |
| <b>Figura 3.5</b> – Tipos de instalação dos sensores ultrassônicos.....                                                                        | 57 |
| <b>Figura 3.6</b> – Espectro contínuo e espectro discreto do laser .....                                                                       | 59 |
| <b>Figura 3.7</b> – Funcionamento do sensor laser como reflexão .....                                                                          | 59 |
| <b>Figura 3.8</b> – Tipos de modulação de RADAR .....                                                                                          | 61 |
| <b>Figura 3.9</b> – Sinal modulante para radar pulsado .....                                                                                   | 61 |
| <b>Figura 3.10</b> – Portadoras de RADAR não coerentes.....                                                                                    | 62 |
| <b>Figura 3.11</b> – Portadoras de RADAR coerentes.....                                                                                        | 62 |
| <b>Figura 3.12</b> – Sinal gerado e recebido após ser rebatido e degradado .....                                                               | 63 |
| <b>Figura 3.13</b> – Sinal modulado em frequência.....                                                                                         | 63 |
| <b>Figura 3.14</b> – Geração do sinal FMCW .....                                                                                               | 64 |
| <b>Figura 3.15</b> – Gráfico da influência da temperatura e pressão sobre a velocidade de propagação considerando $\epsilon_{rN}=1,0006$ ..... | 66 |
| <b>Figura 4.1</b> – Sensor em navio tanque .....                                                                                               | 67 |
| <b>Figura 4.2</b> – Diagrama em blocos do sistema com uma antena .....                                                                         | 68 |
| <b>Figura 4.3</b> – Diagrama de irradiação de uma antena parabólica .....                                                                      | 69 |
| <b>Figura 4.4</b> – Sensor com antena Parábola .....                                                                                           | 70 |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 4.5</b> – Sensor com antena Horn .....                                                                | 70 |
| <b>Figura 4.6</b> – Diagrama de propagação comparativo das antenas Horn, Helicoidal e Parábola com dipolo ..... | 70 |
| <b>Figura 4.7</b> – Circulador de micro-ondas .....                                                             | 71 |
| <b>Figura 4.8</b> – Isolador .....                                                                              | 71 |
| <b>Figura 4.9</b> – PLL de estabilização do oscilador VCO .....                                                 | 72 |
| <b>Figura 4.10</b> – Gráfico de resposta do oscilador VCO .....                                                 | 72 |
| <b>Figura 4.11</b> – Curva de resposta de um amplificador sintonizado .....                                     | 74 |
| <b>Figura 4.12</b> – Amplificador sintonizado.....                                                              | 74 |
| <b>Figura 4.13</b> – Misturador.....                                                                            | 75 |
| <b>Figura 4.14</b> – Diagrama em bloco do sistema com duas antenas .....                                        | 76 |
| <b>Figura 4.15</b> – Sinal gerado e sinal de retorno após propagação .....                                      | 77 |
| <b>Figura 5.1</b> – Diagrama de protótipo .....                                                                 | 78 |
| <b>Figura 5.2</b> – Diagrama do sistema de transmissão .....                                                    | 80 |
| <b>Figura 5.3</b> – Analisador de espectro .....                                                                | 81 |
| <b>Figura 5.4</b> – Módulo sintetizador e oscilador VCO .....                                                   | 81 |
| <b>Figura 5.5</b> – Gráfico do sinal modulante .....                                                            | 83 |
| <b>Figura 5.6</b> – Diagrama do sistema de recepção .....                                                       | 83 |
| <b>Figura 5.7</b> – Antena de recepção com dipolo meia onda .....                                               | 84 |

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 5.8</b> – Diagrama de irradiação da antena de recepção .....                                                 | 85 |
| <b>Figura 5.9</b> – Antena de transmissão com RADOME .....                                                             | 85 |
| <b>Figura 5.10</b> – Diagrama de irradiação da antena de transmissão .....                                             | 86 |
| <b>Figura 5.11</b> – Dipolo meia onda .....                                                                            | 86 |
| <b>Figura 5.12</b> – Foto do circuito comparador detector de fase e frequência .....                                   | 89 |
| <b>Figura 5.13</b> – Diagrama de blocos do sintetizador utilizado .....                                                | 89 |
| <b>Figura 5.14</b> – Foto das antenas de transmissão e recepção .....                                                  | 90 |
| <b>Figura 5.15</b> – Placa de desenvolvimento ARDUINO UNO .....                                                        | 90 |
| <b>Figura 5.16</b> – Foto dos testes de modulação no laboratório .....                                                 | 91 |
| <b>Figura 5.17</b> – Tela do software de geração do ARDUINO UNO .....                                                  | 91 |
| <b>Figura 5.18</b> – Gráfico de medida de nível em relação à diferença das frequências de transmissão e recepção ..... | 94 |



## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 2.1</b> – Permissividade de alguns materiais em condições normais de temperatura (273 K) e pressão absoluta (1 bar)..... | 35 |
| <b>Tabela 2.2</b> – Dielétrico sob condições normais de temperatura, pressão e porcentagem de erro .....                           | 35 |
| <b>Tabela 2.3</b> – Classificação dos materiais quanto à condutividade elétrica.....                                               | 36 |
| <b>Tabela 2.4</b> – Faixa de operação de micro-ondas segundo padronização do IEEE .....                                            | 42 |
| <b>Tabela 2.5</b> – Influência do ambiente nas ondas .....                                                                         | 44 |
| <b>Tabela 3.1</b> – Dispositivo de medida de nível contínuo.....                                                                   | 53 |
| <b>Tabela 3.2</b> – Comparativo interferência do ambiente nos sensores de nível sem contato..                                      | 55 |
| <b>Tabela 3.3</b> – Comparativo de desempenho e aplicação de sensores de nível.....                                                | 55 |
| <b>Tabela 5.1</b> – Tensão de modulação do VCO gerada pelas palavras binárias originadas no ARDUINO.....                           | 82 |
| <b>Tabela 5.2</b> – Cálculo de níveis em relação à $f_0$ .....                                                                     | 93 |
| <b>Tabela 5.3</b> – Cálculo do diâmetro da área de projeção na superfície .....                                                    | 95 |

## LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

|        |                                                     |
|--------|-----------------------------------------------------|
| GHz    | Giga Hertz                                          |
| FMCW   | Onda contínua com modulação em frequência           |
| RADAR  | RADio Detecting And Ranging                         |
| VCO    | Voltage-Controlled Oscillator                       |
| RADOME | Radar Dome                                          |
| bar    | Unidade de pressão barométrica                      |
| IEEE   | Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos |
| MHz    | Frequência em Mega hertz                            |
| VHF    | Very High Frequency                                 |
| HF     | High Frequency                                      |
| UHF    | Ultra High Frequency                                |
| SHF    | Super High frequency                                |
| EHF    | Extremely High frequency                            |
| SONAR  | Sound Navigation and Ranging                        |

|              |                                                               |
|--------------|---------------------------------------------------------------|
| LASER        | Light amplification by simulated emission of radiation        |
| CW           | Continue Wave                                                 |
| PRF          | Radar de onda pulsada                                         |
| PRT          | Onda portadora de sinal transmitido                           |
| PLL          | Phase Locked Loop                                             |
| dB           | Decibel                                                       |
| USB          | Universal Serial Bus                                          |
| K            | Temperatura em Kelvin                                         |
| $F_0$        | Frequência inicial                                            |
| $\mu$        | Permeabilidade magnética do meio                              |
| $\mu_0$      | Permeabilidade magnética correspondente à propagação no vácuo |
| $\epsilon_r$ | Constante dielétrica ou Permissividade relativa ao meio       |
| E            | Intensidade elétrica em Volts                                 |
| $\epsilon_0$ | Constante de permissividade do vácuo                          |
| $c_0$        | Velocidade na luz no vácuo                                    |
| $\epsilon'$  | Componente real da constante dielétrica                       |

|                    |                                                                     |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------|
| $j \varepsilon''$  | Componente imaginária da constante dielétrica                       |
| $c$                | Velocidade de propagação no meio específico                         |
| $\varepsilon$      | Permissividade do meio                                              |
| $\varepsilon_{rn}$ | Constante do gás ou vapor sob condições normais de temperatura      |
| $\theta_N$         | Temperatura normal de referência 273 K                              |
| $P_N$              | Pressão normal a 1 bar absoluto                                     |
| $P$                | Pressão do processo em bar                                          |
| $\theta$           | Temperatura do processo em kelvin                                   |
| $\sigma$           | Condutividade elétrica em Siemens por metro                         |
| $\omega$           | Frequência angular em radianos por segundo                          |
| $f$                | Frequência do sinal em hertz                                        |
| $p$                | Densidade de potência em watts por metro quadrado                   |
| $P_t$              | Potência irradiada em watts                                         |
| $R$                | Distância da fonte irradiante em metros                             |
| $G$                | Ganho do sinal                                                      |
| $p'$               | Intensidade mínima de recepção de sinal em Watts por metro quadrado |

|                    |                                                                           |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $\theta_i$         | Ângulo de incidência do sinal e graus                                     |
| $\theta_r$         | Ângulo de reflexão do sinal em graus                                      |
| $\Gamma$           | Coeficiente de reflexão                                                   |
| $Z_1$              | Impedância intrínseca do meio 1                                           |
| $Z_2$              | Impedância intrínseca do meio 2                                           |
| $\theta_R$         | Ângulo de refração                                                        |
| $\Gamma_{en}$      | Coeficiente de reflexão do campo elétrico normal ao plano de incidência   |
| $\Gamma_{hn}$      | Coeficiente de reflexão do campo elétrico paralelo ao plano de incidência |
| $\mu_1$            | Permeabilidade magnética do meio1                                         |
| $\varepsilon_1$    | Permissividade relativa ao meio 1                                         |
| $\mu_2$            | Permeabilidade magnética do meio2                                         |
| $\varepsilon_2$    | Permissividade relativa ao meio 2                                         |
| $T_{en}$           | Coeficiente de refração do campo elétrico normal ao plano de incidência   |
| $T_{hn}$           | Coeficiente de refração do campo elétrico paralelo ao plano de incidência |
| $^{\circ}\text{C}$ | Temperatura em graus Celsius                                              |

|            |                                                                    |
|------------|--------------------------------------------------------------------|
| TX         | Transmissão ou transmissor                                         |
| RX         | Recepção ou receptor                                               |
| $G_t$      | Ganho da antena transmissora                                       |
| $\phi$     | Área do eco ou área de reflexão do sinal em metro quadrado         |
| $G_r$      | Ganho da antena receptora                                          |
| $P_r$      | Potência do sinal recebido em Watts                                |
| S          | Potência do eco recebido                                           |
| $\lambda$  | Comprimento de onda em metro                                       |
| A          | Área superficial esférica em metros quadrado                       |
| r          | Raio da área superficial esférica em metros                        |
| $r_{max}$  | Distância máxima para garantir o nível mínimo “limiar de recepção” |
| $P_{rmin}$ | Potência mínima de recepção em watts                               |
| $P_a$      | Pressão adicional à pressão hidrostática ambiente                  |
| Ph         | Pressão hidrostática ambiente                                      |
| $P_A$      | Pressão de amplitude máxima da onda                                |
| t          | Período em segundos, tempo de propagação                           |

|                  |                                                      |
|------------------|------------------------------------------------------|
| $I$              | Intensidade do sinal ultrassônico atenuado           |
| $I_0$            | Intensidade da fonte de radiação ultrassônica        |
| $d'$             | Distância a partir da fonte de emissão ultrassônica  |
| $\alpha$         | Coeficiente de absorção                              |
| $\eta_s$         | Força de cisalhamento                                |
| $\eta_b$         | Viscosidade da cavidade                              |
| $k'$             | Condutividade térmica do meio                        |
| $C_p$            | Calor específico à pressão constante                 |
| $\gamma$         | Capacidade calorífica                                |
| $D$              | Distância do sensor Laser até a superfície           |
| $T$              | Tempo de propagação do pulso do laser                |
| $N$              | Índice de refração para o gás /vapor                 |
| $\Delta f_{dev}$ | Faixa de variação de frequência modulante            |
| $T_m$            | Período do sinal modulante                           |
| $i_0$            | Intensidade o sinal modulante no nível de referencia |
| $\Delta i$       | Faixa de variação de intensidade do sinal modulante  |

|             |                                                                      |
|-------------|----------------------------------------------------------------------|
| $K$         | Índice de modulação                                                  |
| $\varphi_0$ | Fase inicial em radianos                                             |
| $S_0$       | Amplitude do sinal emitido em volts                                  |
| $S_R$       | Amplitude do sinal recebido em volts                                 |
| $t_0$       | Tempo de ida e volta do sinal                                        |
| RF          | Radio frequência                                                     |
| $E$         | Intensidade do campo eletromagnético irradiado pela antena           |
| $E_{iso}$   | Intensidade do campo eletromagnético irradiado por antena isotrópica |
| $D$         | Diretividade de uma antena                                           |
| $\eta$      | Eficiência de uma antena                                             |
| $\phi$      | Largura de feixe ou ângulo de abertura                               |
| $d$         | Diâmetro do refletor parabólico                                      |
| $V_{Cmin}$  | Tensão de controle mínima                                            |
| $V_{Cmax}$  | Tensão de controle máxima                                            |
| $V_c$       | Tensão de controle                                                   |
| BW          | Faixa de frequência passante                                         |



|       |                                                                                       |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $f_d$ | Diferença entre a frequência que está sendo gerada no momento e a frequência recebida |
| $F_R$ | Frequência recebida                                                                   |
| $D_a$ | Diâmetro da área de projeção do sinal na superfície                                   |

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização do Problema

Neste trabalho de dissertação é apresentado o estudo das características de um sensor de nível por RADAR (*RA*dio *D*etecting *A*nd *R*anging) de onda contínua com modulação em frequência (FMCW) na faixa de 2,5 GHz para montagem de um protótipo.

A aplicação deste dispositivo se faz devido à necessidade de otimização das plantas industriais, que trabalham com dados de inúmeras variáveis físicas compatíveis com as exigências de cada meio de propagação e produto, com qualidade e confiabilidade por meio de sensores de nível em silos e tanques que não possam ter contato físico com o produto durante o processo de produção industrial, sendo a medição de nível a quarta mais utilizada em plantas industriais (Waldschmidt, 2008).

Para compreensão do funcionamento são abordados conceitos sobre as ondas eletromagnéticas, propagação, modulação, influência do ambiente, importância do controle de nível em processos produtivos industriais, teoria e a tecnologia *RADAR FMCW* aplicada nos sensores para medições de nível de sólidos e líquidos.

### 1.2 Desenvolvimento histórico

Como visão global para estudo dos segmentos aplicados ao sensor de nível por radar FMCW, observou-se vários segmentos que compõe o funcionamento básico do dispositivo.

Por se tratar de um dispositivo que utiliza radio frequência analisou-se o desenvolvimento histórico sobre o eletromagnetismo. Os primeiros relatos foram no ocidente feitos por *Peregrinos* em 1269 além de descrever a magnetita e suas propriedades, definia a propriedade do imã.

Em 1820 o professor dinamarquês *Hans Christian Oersted* conseguiu provar, experimentalmente, que quando uma corrente elétrica passava ao longo de um fio aparecia um campo magnético. (Tort et al, 2004). Nos anos seguintes, *Michael Faraday*, na Inglaterra, iniciou suas pesquisas.

Para explicar como a eletricidade e o magnetismo podiam afetar um ao outro no espaço vazio, *Faraday* propôs a ideia de um campo. Imaginando linhas de força magnética tanto mais próximas umas das outras, mais intenso era esse campo e supondo que essas linhas tendiam a se encurtar sempre que possível e a se repelir mutuamente, em 1837, *Faraday* introduziu também a ideia de linhas de força elétrica.

O físico escocês *James Clark Maxwell*, em 1861, por meio de cálculos em eletrodinâmica chega a um resultado de suma importância para a óptica e o eletromagnetismo, onde a equivalência entre a velocidade da luz e das ondas eletromagnéticas era visível (Ribeiro, 2004).

*Maxwell* reuniu os conhecimentos existentes e descobriu as correlações que havia em alguns fenômenos, dando origem à teoria de que eletricidade, magnetismo e óptica são de fato manifestações diferentes do mesmo fenômeno físico.

A análise matemática completa dos fenômenos elétricos e magnéticos aceita hoje, apareceu em 1873 quando *Maxwell* publicou seu *Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo*.

A *Teoria de Maxwell* correlacionou uma série de quatro equações, que descrevem a interação das componentes elétricas e magnéticas do campo eletromagnético e sua relação com a voltagem e corrente elétrica (Ribeiro, 2004). Estas equações proporcionam a base teórica do eletromagnetismo e com seu emprego podem ser resolvidos os problemas de campos eletromagnéticos e de irradiação. São elas: a Lei circuital de Ampère, a Lei de Gauss para campos elétricos, a Lei de Gauss para campos magnéticos e a Lei de Faraday sobre a força eletromotriz (Ribeiro, 2004). As confirmações da teoria de Maxwell se deram em 1887 pela verificação experimental feita por *Heinrich Rudolf Hertz* (1857-1894), que produziu ondas eletromagnéticas por meio de circuitos oscilantes e, depois, detectou-se por meio de outros circuitos sintonizados na mesma frequência.

A aplicação dos estudos relacionados aos fenômenos sobre as ondas eletromagnéticas de *James Clark Maxwell* (Waser, 2000) e influência do meio, proporcionaram ao físico alemão *Heinrich Rudolf Hertz* o desenvolvimento do RADAR demonstrando que as ondas de rádio se comportam como se fossem ondas de luz, podendo ser refletidas por objetos, assim como a luz é refletida por um espelho (Ulaby, 2007).

Na década de 1930, vários países, dentre eles o Reino Unido, os Estados Unidos, a França, a Alemanha e o Japão, iniciaram pesquisas para produzir sistemas de RADAR capaz de detectar aviões e navios a grandes distâncias e sob baixas condições de visibilidade.

Antes do início da Segunda Guerra Mundial, o Reino Unido já possuía uma rede de estações de radar capaz de perceber a aproximação de aviões inimigos, entretanto o RADAR teve seu desenvolvimento acelerado durante a guerra mencionada (Devine, 2000).

Em poucos anos, os ingleses desenvolveram aparelhos de RADAR pequenos o bastante para serem instalados em aviões de caça. Ao mesmo tempo, nos Estados Unidos, eram criados equipamentos de radar capazes de controlar o disparo de canhões. Ao longo da Segunda Guerra Mundial, o esforço conjunto de pesquisadores americanos e britânicos produziu equipamentos de RADAR de micro-ondas de alta potência para uso militar.

Após a década de 40, o desenvolvimento dos radares prosseguiu com o aperfeiçoamento dos componentes e circuitos eletrônicos como transistores e circuitos integrados.

A aplicação de novos métodos de rastreamento e o emprego de computadores de alta velocidade para o processamento dos sinais também contribuíram de forma significativa para a eficiência, a confiabilidade e a redução do tamanho físico dos equipamentos de RADAR.

A tecnologia aplicada aos radares passou a ser utilizada em outros segmentos, dentre eles a indústria, que devido à necessidade de ter o acompanhamento em tempo real das etapas do processo produtivo, demanda o desenvolvimento de novos tipos de sensores que possam detectar a variação de níveis de diversos tipos e compostos de materiais em condições adversas.

Os sensores de medida de nível do tipo RADAR podem operar com base no tempo ocorrido entre a transmissão e a recepção da onda refletida, ou podem operar com base na diferença de frequência entre a onda emitida e a onda refletida, processo que utiliza a modulação da onda portadora em frequência FMCW.

Em 1970 a modulação FMCW foi utilizada no desenvolvimento do primeiro sensor de nível por RADAR, utilizado na medida do nível de óleo armazenado nos tanques de navios petroleiros.

Em 1980 os sensores de nível foram empregados em tanques de armazenamentos para os quais se desejava uma medida de nível sem que fosse necessário contato com o produto (Ribeiro, 2008).

Como exemplo prático, a CSN Companhia Siderúrgica Nacional localizada em Volta Redonda – RJ vem realizando a substituição de sensores mecânicos do tipo sensor com cabo e pera, Figura 1.1, por sensor RADAR FMCW, Figura 1.2, utilizado em ambientes agressivos como a medida de carga de minério em alto forno (Motta, 2011).



**Figura 1.1-** Conjunto de dispositivos que compõe uma sonda mecânica



**Figura 1.2 -** Sensor Radar FMCW

Existem inúmeros tipos de sensores que fazem a coleta de dados referentes ao nível de material, alguns necessitam ter contato com a substância medida, a exemplo do sensor de cabo com pera, e outros não.

Como um elemento para medida de nível, a tecnologia do RADAR vem evoluindo em dois segmentos distintos, (i) dispositivos que utilizam ondas guiadas os quais mantêm contato físico com o produto a ser medido e também (ii) os radares sem guia de onda, sistemas que não tem contato físico com o produto a ser medido.

O desenvolvimento de sensores que trabalham com a tecnologia do RADAR operando na faixa de frequência de micro-ondas, atualmente encontra-se restrito aos laboratórios de poucos fabricantes.

A tecnologia que emprega RADAR FMCW tem como uma de suas aplicações o acionamento de ogivas o que torna o acesso aos componentes restrito e controlado. Devido esta restrição o sensor de nível que utiliza as técnicas de RADAR de micro-ondas é pouco difundido e tem o custo elevado, limitando a sua aplicação a poucos segmentos.

Novos dispositivos amplificadores, osciladores e mixer na faixa de 90 GHz-Banda W, estão sendo desenvolvidos por pesquisadores, (Baek et al, 2011) atualmente buscando a melhoria da exatidão dos dispositivos, chegando a faixas de milímetros na medição de nível em tanques.

Atualmente o sensor de nível por RADAR de micro-ondas é utilizado em diversas etapas industriais como exemplo, na indústria petrolífera na medida de nível em tanques e navios, na indústria siderúrgica para medida de carga de alto forno e vagões de transporte de gusa. Nestes casos o interessante é a ausência do contato físico do sensor com o produto a ser medido.

Este tipo de sensor normalmente utiliza um software de correção considerando as varias características dos produtos a serem medidos tais como: o tipo de substância com suas propriedades, influências da reflexão e absorção das ondas eletromagnéticas na faixa de frequência utilizada e na eliminação de reflexões falsas (ecos), que podem aparecer devido a não linearidade da superfície e obstáculos presentes no ambiente medido.

Este trabalho é dividido em 6 capítulos, sendo este o primeiro, introdutório.

No capítulo 2 são apresentados alguns fundamentos teóricos relevantes ao dispositivo proposto como: fundamentos sobre eletromagnetismo, micro-ondas e a influência do meio de propagação nas ondas eletromagnéticas e funcionamento do RADAR.

No capítulo 3, são descritas as características gerais sobre sensores, conceitos, tipos utilizados na medição de nível, particularidades vantagens e desvantagens de cada método.

No capítulo seguinte, capítulo 4, destacam-se os tipos de sensores radar micro-ondas quanto aos tipos de modulação, condução e processamento da informação.

No capítulo 5 são apresentados, os módulos do protótipo proposto às características de cada etapa, testes executados, características e parâmetros dos componentes utilizados, em um sensor para medida de nível por meio do método empregado, em radar na faixa de micro-ondas modulado em frequência FMCW.

Conclusão, sugestões para novos trabalhos e dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do protótipo são apresentados no capítulo 6.

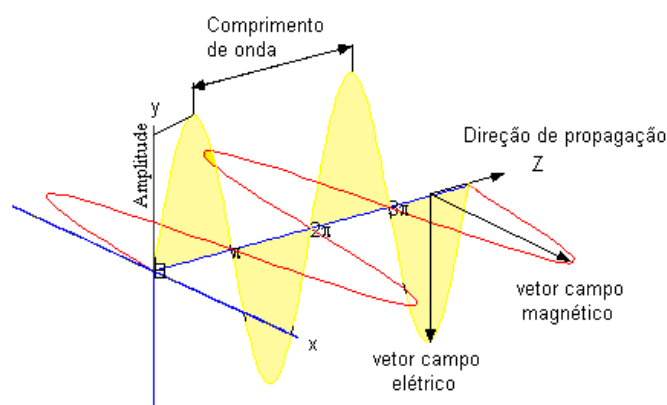
## CAÍTULO 2 - FUNDAMENTO TEÓRICOS

Neste capítulo são abordados fundamentos relacionados ao sensor de nível por RADAR de micro-ondas FMCW sendo eles: eletromagnetismo, micro-ondas, influência do meio na propagação das ondas eletromagnéticas na faixa de micro-ondas e funcionamento do RADAR.

O sensor de nível por RADAR de micro-ondas FMCW é um dispositivo cujo funcionamento se faz por meio da comparação das ondas eletromagnéticas emitidas e recebidas. Um circuito oscilador gera uma onda portadora que passa por um processo de modulação em frequência por meio de um sinal modulante. O sinal modulante aplicado a este experimento é produzido por um conversor de valores binários em níveis de tensão que causam um desvio proporcional do oscilador controlado por tensão (VCO) gerando novas frequências na portadora que será transmitida.

### 2.1 Eletromagnetismo

Com base na teoria da corrente alternada, um campo variável que resulta do fluxo de uma corrente alternada em um circuito, induz uma voltagem em um condutor colocado dentro do campo; desta forma, um campo magnético cria no espaço um campo elétrico variável. O campo elétrico, por sua vez, produz uma corrente de deslocamento que gera um campo magnético, o qual cria um campo elétrico, e assim por diante, formando um sistema dextrogiro, representado na Figura 2.1. A indução e propagação eletromagnética podem ser comprovadas pelas equações de Maxwell (Ribeiro, 2004).



**Figura 2.1** - Propagação do campo eletromagnético e campo elétrico em direção a Z, de um sistema dextrogiro



Em um campo de irradiação eletromagnética, as linhas do campo elétrico se fecham sobre si mesmas, não estando unidas a cargas elétricas; as linhas do campo magnético não estão relacionadas à corrente em um condutor. Os campos são verdadeiramente independentes, como se houvessem sido liberados no espaço. Há, portanto, uma ideia de movimento no processo, sendo esta propagação denominada onda eletromagnética.

O comportamento das ondas eletromagnéticas é afetado pelo meio que atravessam devido às influências relacionadas à permeabilidade magnética  $\mu$ , a constante dielétrica ou permissividade relativa  $\epsilon_r$ , a condutividade elétrica  $\sigma$ , causadas por: dispersão, absorção, atenuação, reflexão, refração e difração, considerando

### 2.1.1 Permeabilidade Magnética do meio ( $\mu$ )

A permeabilidade magnética é propriedade inerente aos meios de propagação, a qual influencia o campo eletromagnético do sinal. Tais influências são mais acentuadas em meios ferromagnéticos, ferrimagnéticos e outros especiais (Bastos, 2010). A permeabilidade magnética correspondente à propagação no vácuo  $\mu_0$  [ $H / m$ ] pode ser expressa (Ribeiro, 2004):

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \quad (2.1)$$

que resulta aproximadamente em  $12,5664 \cdot 10^{-7}$  [ $H/m$ ].

De acordo com as propriedades específicas de cada meio obtêm-se um valor relativo ou específico  $\mu_r$  comparando-se a permeabilidade do material ou meio à permeabilidade do vácuo. A permeabilidade do meio de propagação  $\mu$  [ $H/m$ ] obtida por:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (2.2)$$

### 2.1.2 Constante dielétrica ou Permissividade relativa ao meio ( $\epsilon_r$ )

A permissividade elétrica é “uma grandeza associada às propriedades relativas às polarizações atômicas e moleculares do material” (Ribeiro, 2004) cuja relação da propagação das ondas no vácuo nos permite relacionar as variáveis de um meio de propagação diferente. Levam-se em consideração suas características e influência nas

ondas eletromagnéticas e elétricas e a análise da influência do meio de propagação com suas características dielétricas, conforme Tabela 2.1.

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \quad (2.3)$$

onde  $E$  [V] é a intensidade elétrica dada em volts e  $\epsilon_0$  [F/m] a constante de permissividade do vácuo dada por:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{c_0^2 \mu_0} = 8,85418 \cdot 10^{-12} \quad (2.4)$$

sendo  $c_0 = 2,99792458 \times 10^8 \cong 3 \times 10^8$  [m/s] correspondente a velocidade da luz no vácuo e  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo.

As características dielétricas dos materiais podem apresentar alterações por influência de varios fatores como, temperatura, pressão, frequência do sinal, amplitude do campo elétrico aplicado, densidade do material e outras, sendo representada por uma característica complexa, com a parte imaginária negativa sendo:

$$\epsilon_r = \epsilon' - j \epsilon'' \quad (2.5)$$

Entretanto, em materiais que apresentam baixas perdas o valor de parte real é muito maior que a parte imaginaria.

A influência da característica dielétrica pode atenuar o sinal, e também causar uma diferença na velocidade de propagação. Pode-se obter o valor da velocidade de propagação  $c$  [m/s] em um meio específico por:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (2.6)$$

onde a constante dielétrica é dada por:

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (2.7)$$

sendo  $\varepsilon$  a permissividade do meio que pode ser obtida conforme a Tabela 2.1.

**Tabela 2.1-** Permissividade de alguns materiais em condições normais de temperatura (273 K) e, pressão absoluta (1 bar).

| <b>Material</b> | <b><math>\varepsilon</math> (pF/m)</b> | <b>Material</b> | <b><math>\varepsilon</math> (pF/m)</b> |
|-----------------|----------------------------------------|-----------------|----------------------------------------|
| Óleo mineral    | 19,5                                   | Látex           | de 20 a 50                             |
| Acetona         | 191                                    | Madeira         | de 10 a 50                             |
| Ar              | 8,84                                   | Papelão         | 49,5                                   |
| Água destilada  | 707                                    | PVC             | de 30 a 40                             |
| Baquelita       | de 50 a 8                              | Vidro           | de 40 a 60                             |

No caso de condições de temperatura e pressão diferentes, pode-se ter um novo valor de permissividade relacionado ao meio de propagação a exemplo da Tabela 2.2.

$$\varepsilon = 1 + (\varepsilon_{rn} - 1) \cdot \frac{\theta_N \cdot P}{\theta \cdot P_N} \quad (2.8)$$

onde  $\varepsilon_{rn}$  é a constante do gás ou vapor sob condições normais de temperatura  $\theta_N = 273$  K e pressão,  $P_N$ , sob condição normal de 1 bar absoluto, temperatura do processo  $\theta$  em Kelvin sob condições normais e pressão do processo  $P$  em bar absoluto (Devine, 2000).

**Tabela 2.2** Dielétrico sob condições normais de temperatura, pressão, humidade e percentagem de erro

| <b>Gás/Vapor/Vácuo</b>    | <b><math>\varepsilon_{rn}</math></b> | <b>Porcentagem de erro em relação ao ar em condições normais de pressão e temperatura</b> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vácuo                     | 1,000                                | +0.0316                                                                                   |
| Ar                        | 1,000633                             | 0,0                                                                                       |
| Monóxido de carbono CO    | 1,000692                             | - 0,00295                                                                                 |
| Hélio                     | 1,000072                             | + 0,0280                                                                                  |
| Oxigênio O <sub>2</sub>   | 1,000530                             | + 0,0052                                                                                  |
| Nitrogênio N <sub>2</sub> | 1,000576                             | + 0,00285                                                                                 |

**Fonte:** Devine (2000)

### 2.1.3 Condutividade elétrica ( $\sigma$ )

A condutividade elétrica é uma propriedade que indica a facilidade com que as cargas elétricas livres se deslocam em um meio, sob ação de um campo elétrico, influenciando também o comportamento do campo eletromagnético. Expressa em siemens por metro (S/m), indica a ação das propriedades do material em relação ao deslocamento das cargas elétricas, possibilitando a classificação quanto a sua condutividade elétrica. Para condutores perfeitos, seu valor tende para infinito, impossibilitando a presença de campo eletromagnético em seu interior. No caso de um dielétrico perfeito, não se tem cargas elétricas livres não possibilitando deslocamento assim, a condutividade é nula. Para meios classificados como condutores reais, como exemplo o cobre, a condutividade é muito elevada, da ordem de dezenas de mega siemens por metro, porém tem valor finito. Em termos práticos, estabelecem-se alguns critérios para indicar se o meio atua como condutor, dielétrico ou em nenhuma destas opções. Quando não forem possíveis as duas primeiras classificações, identifica-se o material como quase condutor. Um critério para esta identificação obedece às relações da Tabela 2.3 (Ribeiro, 2004; Bastos, 2010).

**Tabela 2.3** Classificação dos materiais quanto à condutividade elétrica

|                                                                                    |                     |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| $\sigma \geq 100\omega\varepsilon$                                                 | Meio condutor       |
| $\sigma \leq \frac{\omega\varepsilon}{100}$                                        | Meio dielétrico     |
| $\frac{1}{100} < \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} < \frac{\omega\varepsilon}{100}$ | Meio quase condutor |

Fonte: Ribeiro (2004)

onde  $\varepsilon$  é a permissividade elétrica do meio,  $\omega = 2\pi f$  [rad/s] a frequência angular e  $f$  [Hz] a frequência do sinal.

#### 2.1.4 Espalhamento das Ondas Eletromagnéticas

A potência ou energia que emana de uma fonte é projetada em todas as direções. Isso, no entanto, não quer dizer que essa projeção é uniforme. Na realidade, no caso de algumas fontes altamente direcionais, a quantidade de energia irradiada ao longo de algumas direções é desprezível, ou mesmo nula.

Uma fonte isotrópica que irradia uniformemente em todas as direções, considerando uma esfera do espaço que envolva esta fonte, nos assegura que toda a energia irradiada deverá cruzar a superfície esférica, qualquer que seja o tamanho da esfera considerada.

Em consequência, pode ser visualizada a forma pela qual a mesma intensidade de energia terá que preencher espaços cada vez maiores, resultando em densidades de potência cada vez menores. Em um ambiente ilimitado, a densidade da potência obedece a uma lei que indica variação inversamente proporcional ao quadrado da distância.

Para fonte isotrópica

$$p = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (2.9)$$

onde  $p [W/m^2]$  é a densidade de potência a uma distância  $R$  da fonte que irradia uma potência  $P_t$  (Berkpwtitz, 1966).

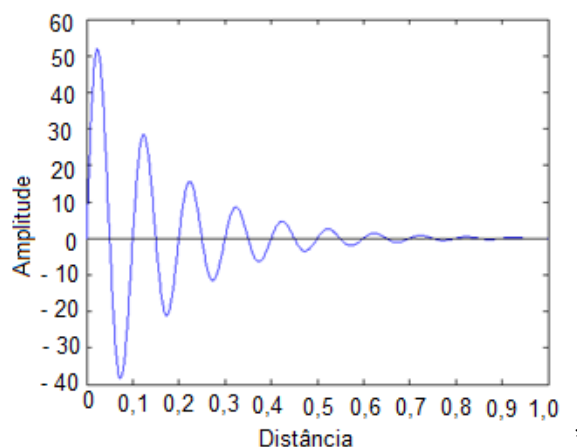
Este princípio aplica-se, ainda, ao caso da irradiação direcional, modificada por um fator de ganho,  $G$ , devido à concentração do sinal irradiado em uma ou mais direções especificadas (Berkpwtitz, 1966). Esta influência aparece na representação

$$p' = \frac{GP_t}{4\pi R^2} \quad (2.10)$$

aplicada na determinação do sinal necessário  $p' [W/m^2]$  para garantir uma recepção com intensidade mínima e boa qualidade.

### 2.1.5 Absorção e Atenuação

A análise anterior mostra a redução na densidade de potência pelo espalhamento da energia. Ocorrem ainda, perdas causadas pela absorção de potência por partículas do meio, sempre quando se tem propagação em ambientes diferentes do vácuo. Em decorrência deste fato, a amplitude do campo eletromagnético decai exponencialmente com a distância, de acordo com a Figura 2.2. As ondas de radiofrequência, além de perderem energia por absorção, também perdem para os obstáculos ou quando há mudança do meio a exemplo de uma onda vinda do ar que é parcialmente refratada para baixo e uma parcela da sua energia é absorvida Figura 2.4.



**Figura 2.2** - Atenuação da Onda Eletromagnética

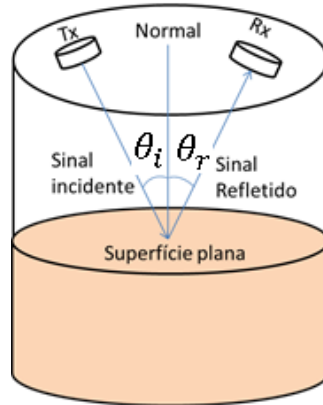
### 2.1.6 Reflexão das Ondas Eletromagnéticas

A reflexão é indispensável para o funcionamento de sensores ativos, como o radar. No caso das ondas eletromagnéticas, a orientação da polarização do campo elétrico em relação à superfície também exercerá influência. O emprego das ondas eletromagnéticas na detecção pode ser prejudicado por sinais refletidos de forma indesejável.

Quando o sinal transmitido encontrar uma superfície de um meio com propriedades diferentes do primeiro, ela será parcialmente refletida.

Este fenômeno obedece as leis da teoria eletromagnética:

- 1 – A direção de propagação da onda incidente e a direção de propagação da onda refletida estão em um mesmo plano perpendicular à superfície de reflexão;
- 2 – O ângulo de incidência “ $\theta_i$ ” é igual ao ângulo de reflexão “ $\theta_r$ ”, como se mostra na Figura 2.3 para uma superfície plana. A relação entre a intensidade do campo incidente e a do campo refletido define o coeficiente de reflexão.



**Figura 2.3** - Reflexão da Onda Eletromagnética em uma superfície plana

O coeficiente de reflexão  $\Gamma$  pode ser determinado em função das impedâncias intrínsecas dos meios  $Z_1$  e  $Z_2$  sendo determinado para o campo elétrico normal ao plano de incidência

$$\Gamma_{en} = \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_r}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_r} \quad (2.11)$$

e para o campo elétrico paralelo ao plano de incidência

$$\Gamma_{hn} = \frac{Z_1 \cos \theta_i - Z_2 \cos \theta_r}{Z_1 \cos \theta_i + Z_2 \cos \theta_r} \quad (2.12)$$

Os ângulos de incidência  $\theta_i$  e de refração  $\theta_R$  são relacionados por meio da lei de Snell:

$$\frac{\sin \theta_r}{\sin \theta_i} = \sqrt{\frac{\mu_1 \varepsilon_1}{\mu_2 \varepsilon_2}} \quad (2.13)$$

### 2.1.7 Refração das Ondas Eletromagnéticas

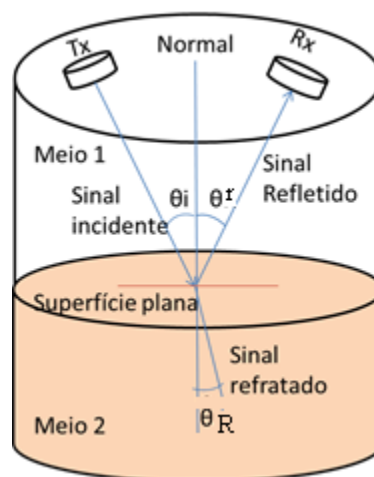
Quando uma onda encontra a superfície limítrofe entre dois meios de densidades diferentes, uma parte da energia é refletida, outra parte da energia é absorvida pelo meio refletor e uma terceira porção pode penetrar, refratar-se e propagar no segundo meio, o coeficiente de refração determinado pelas equações:

$$T_{en} = 1 + \Gamma_{en} = \frac{2 Z_2 \cos \theta_i}{Z_1 \cos \theta_r + Z_2 \cos \theta_i} \quad (2.14)$$

$$T_{hn} = 1 + \Gamma_{hn} = \frac{2 Z_1 \cos \theta_i}{Z_1 \cos \theta_i + Z_2 \cos \theta_r} \quad (2.15)$$

As quantidades de energia envolvidas nesses três processos irão depender, basicamente, da natureza da superfície, das propriedades do material e da frequência da onda.

Quando uma onda eletromagnética incidir com um ângulo  $\theta_i$  sobre uma superfície que separa dois meios onde ocorre uma variação de densidade, haverá um deslocamento do feixe correspondente ao ângulo  $\theta_R$  onde parte do sinal propaga-se pelo meio 2 e parte da energia do sinal correspondente ao ângulo  $\theta_r$  é refletido pela superfície, para o primeiro meio Figura 2.4 (Ribeiro, 2004).

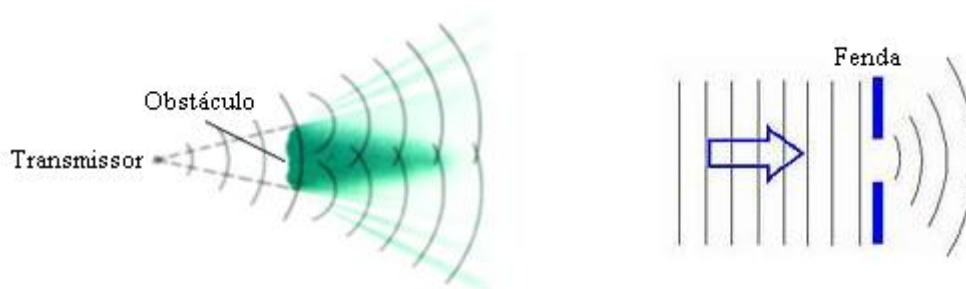


**Figura 2.4** – Reflexão e Refração das Ondas



### 2.1.8 Difração

Ocorre com ondas acústicas, com ondas eletromagnéticas e com partículas que se comportam como ondas. É a dispersão da onda em torno de um obstáculo, em fendas e bordas Figura 2.5.



**Figura 2.5** – Difração de Ondas Eletromagnéticas

**Fonte:** Miguens (1996)

Para as medidas de nível deve-se observar a instalação do dispositivo, para que não tenha nenhum obstáculo entre o sensor e a superfície a ser medida o nível, e também para que não ocorra difração no sinal gerado prejudicando a recepção do mesmo e leituras erradas.

## 2.2 Micro-ondas

Existem algumas indefinições no que se tange a faixa denominada como micro-ondas. Alguns autores consideram a faixa de frequência de 300 a 3000 MHz, porém a faixa de 3 GHz a 30 GHz também é considerada e amplamente aplicada como dispositivos de micro-ondas (Ribeiro, 2004). Nota-se na Figura 2.6 que a faixa de frequência de micro-ondas demonstrada na Tabela 2.4 está localizada entre as ondas muito curtas (VHF) e a faixa de infravermelho. Alguns sensores de nível cuja frequência de trabalho é definida pela aplicação estão em torno 10 e 24 GHz.

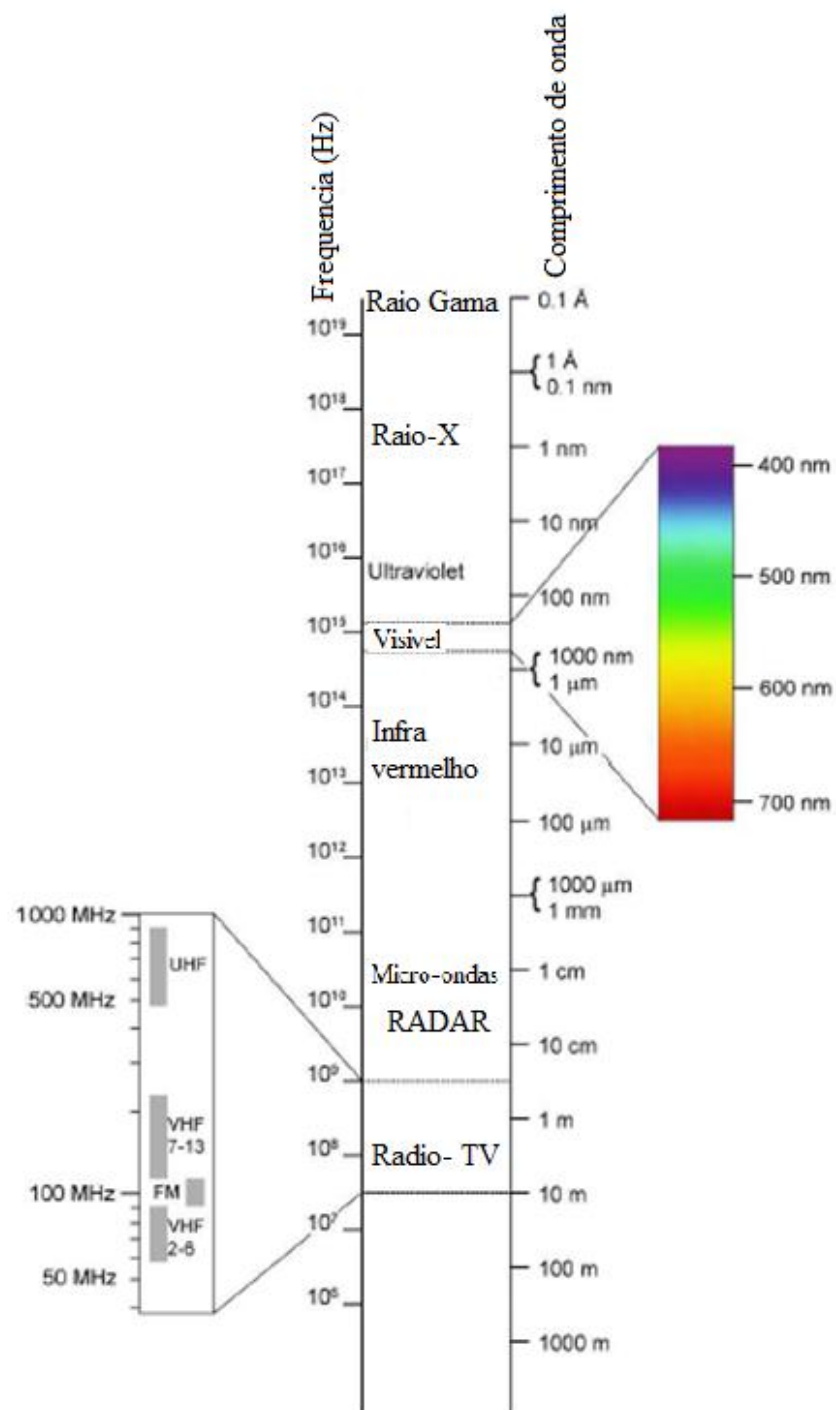
### 2.2.1 Espectro de frequência

O conjunto total das frequências das radiações eletromagnéticas constitui o espectro eletromagnético ou espectro de frequências; Figura 2.6. As frequências nesse espectro variam desde dezenas de Hertz até  $10^{23}$  Hertz, englobando rádio, radar, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios X, raios Gama e outras radiações. O comportamento de uma onda eletromagnética depende, sobretudo, da frequência e do correspondente comprimento de onda.

Atualmente as frequências do espectro que compõe a faixa de micro-ondas foram divididas em bandas pelo IEEE conforme demonstrado na Tabela 2.4.

**Tabela 2.4** Faixa de operação de micro-ondas segundo padronização do IEEE

| <b>Bandas de frequências utilizadas em RADAR</b> |                                  |
|--------------------------------------------------|----------------------------------|
| <b>Banda</b>                                     | <b>Faixa de frequência (Mhz)</b> |
| UHF                                              | 300 – 1.000                      |
| L                                                | 1.000 – 2.000                    |
| <b>S</b>                                         | <b>2.000 – 4.000</b>             |
| C                                                | 4.000 – 8.000                    |
| X                                                | 8.000 – 12.000                   |
| Ku                                               | 12.000 – 18.000                  |
| K                                                | 18.000 – 27.000                  |
| Ka                                               | 27.000 – 40.000                  |
| Q                                                | 33.000 – 46.000                  |
| U                                                | 40.000 – 60.000                  |
| V                                                | 40.000 – 80.000                  |
| E                                                | 60.000 – 90.000                  |
| W                                                | 58.000 – 110.000                 |
| F                                                | 90.000 – 140.000                 |



**Figura 2.6** – Espectro de frequências

Fonte: Waldschmidt (2008)

### 2.2.2 Influência do meio na propagação das micro-ondas

Devem ser levadas em consideração as características do ambiente onde será instalado o dispositivo que opera na faixa de micro-ondas. Entre as propriedades destacam-se: a permissividade e a condutividade que influenciam na definição da potência e da faixa de frequência transmitida. São informações relevantes para garantir eficiência no processo, sem degradações no sinal.

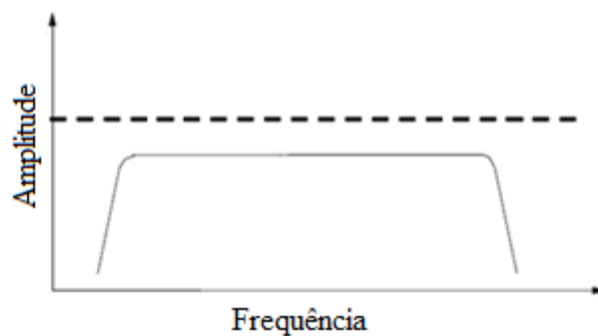
As influências diretas e indiretas causadas pelo meio poderão influenciar no sinal como um todo ou em partes específicas da faixa de frequência causando atenuações, distorções e bloqueio do sinal de micro-ondas utilizado (Barradas e Silva, 1978). Algumas das alterações são demonstradas na Tabela 2.5. O conhecimento do ambiente e análise detalhada das propriedades servirá como fatores de correção para a leitura do nível.

**Tabela 2.5** – Influência do ambiente nas ondas

| <b>Causas</b>           | <b>Efeitos Físicos no Feixe de Onda</b>            | <b>Tipos de desvanecimento</b> |
|-------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| Absorção                | Obstrução                                          | Plano                          |
| Obstáculos              | Atenuação: Absorção<br>Divergência<br>Convergência |                                |
| Inversão térmica        | Interferência                                      |                                |
| Reflexão em superfícies | Degradação                                         | Seletivo                       |

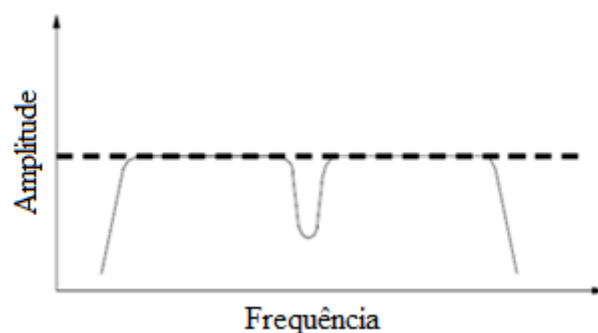
**Fonte:** Lima (2011)

A perda de sinal por desvanecimento pode ocorrer de duas formas: (i) desvanecimento plano, Figura 2.7, que ocorre em toda a faixa de frequência utilizada e o (ii) desvanecimento seletivo, Figura 2.8, que afeta algumas frequências específicas.



**Figura 2.7** – Curva representativa do desvanecimento plano

**Fonte:** Lima (2011)



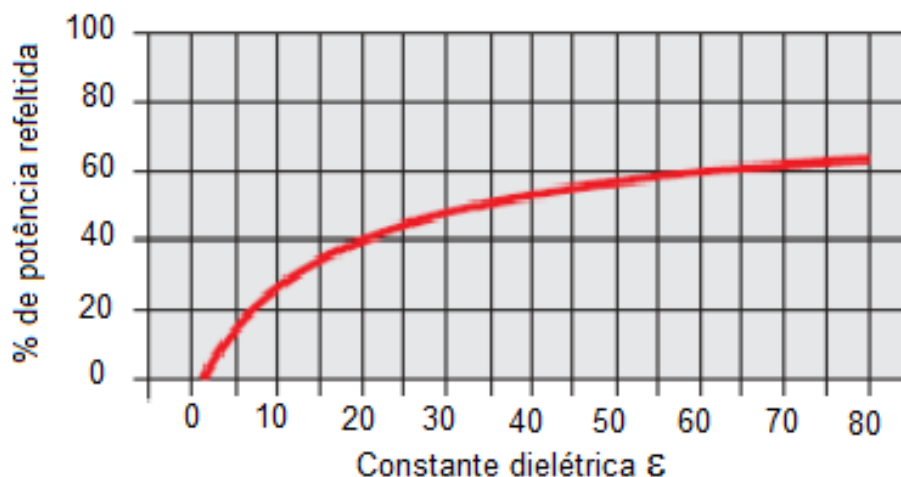
**Figura 2.8** – Curva representativa do desvanecimento seletivo

**Fonte:** Lima (2011)

#### 2.2.2.1 Condutividade do meio de propagação

A condutividade do meio de propagação deve ser considerada na definição da potência do transmissor, as substâncias presentes no ambiente e as características do material a ser medido, influenciam no valor da constante dielétrica ocasionando variação na quantidade de sinal absorvido pelo material, conforme representado na Figura 2.9, (Devine, 2000).

Propriedades químicas, pressão e temperatura são alguns dos parâmetros que devem ser monitorados juntamente ao sensor de nível. A equalização destes dados por um software de correção contribui para se ter uma leitura de nível precisa e confiável.



**Figura 2.9** – Dependência da potência do sinal de Radar refletido com a constante dielétrica

**Fonte:** Devine (2000)

#### 2.2.2.2 *Influência da umidade na propagação das micro-ondas*

A umidade é um dos fatores que deve ser considerado. A condensação de partículas na antena do dispositivo e ou na visada da propagação do sinal causam distorções dependendo do nível deste acúmulo e a influência vai de distorção do sinal até o bloqueio total, causando erro de leitura.

Perturbações, que aumentam muito a densidade de umidade do ar, causam atenuações substanciais nas frequências mais elevadas da faixa de rádio e micro-ondas.

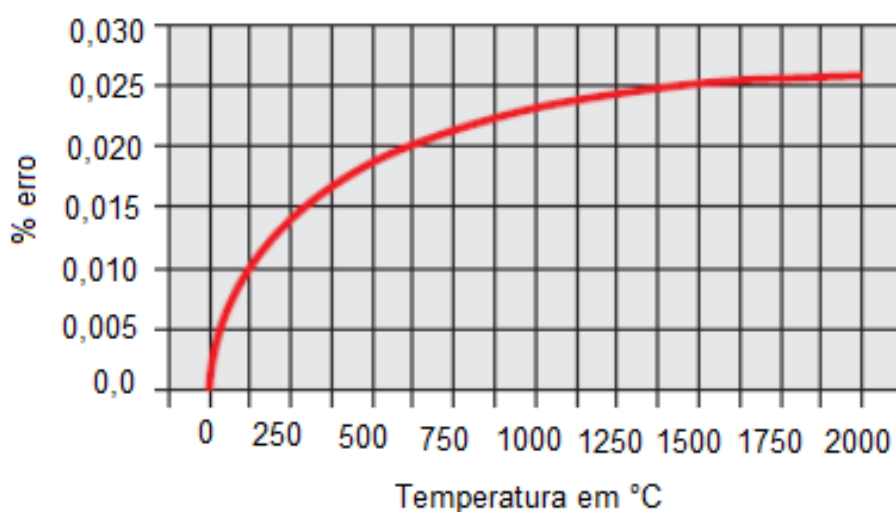
Em frequências das faixas SHF e EHF a absorção atmosférica torna-se um problema, além do que existe a difração devido à presença de gotas de água, moléculas de oxigênio e vapor d'água.

#### 2.2.2.3 *Influência de partículas suspensas*

Devem ser consideradas as características físicas, composição química e a quantidade de partículas em suspensão, que poderão estar presentes devido a manipulação do material nos silos e tanques. Estas partículas podem causar distorções no sinal que devem ser consideradas (Lewis, 2010), podendo ocorrer acúmulo das partículas na antena do sensor, o qual deve ser observado durante as manutenções periódicas do sistema.

#### 2.2.2.4 Influência da temperatura

A temperatura no ambiente no qual o sensor está instalado pode sofrer variações relativas ao próprio processo, bem como a exposição ao sol. Tal parâmetro deve ser levado em consideração, pois esta alteração térmica poderá causar uma variação na concentração das moléculas em suspensão e estas por sua vez causam variações na propagação do sinal micro-ondas (Devine, 2000). A variação térmica no processo pode causar variação nas dimensões do silo afetando a medida do nível se estas variações não forem consideradas, e também variações de medidas como indicada na Figura 2.10.

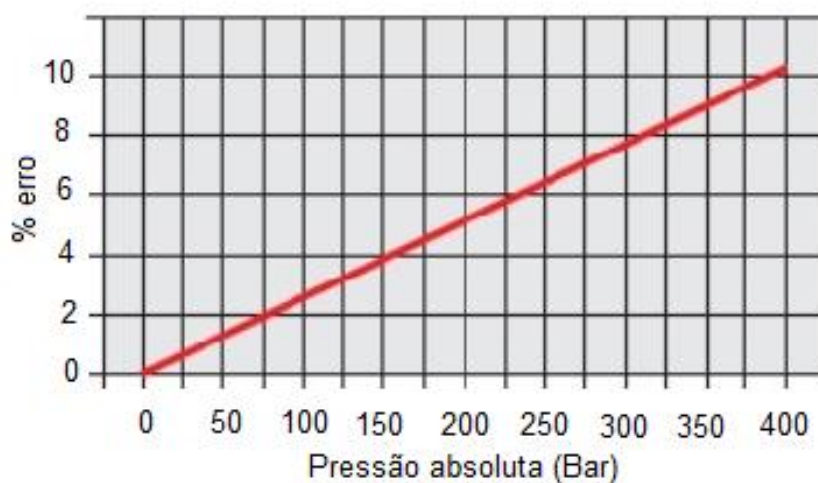


**Figura 2.10** – Gráfico do erro de leitura devido ao aumento da temperatura

**Fonte:** Devine (2000)

#### 2.2.2.5 Influência da pressão

A variação da pressão tem uma influência pequena, na propagação das ondas eletromagnéticas. Podem influenciar no caso de ambientes selados e pressurizados (Devine, 2000), Figura 2.11, e também causar uma deformação do silo causando uma variação na medida de nível do produto armazenado.

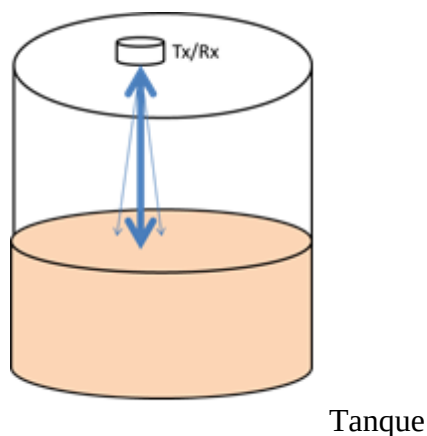


**Figura 2.11** – Erro devido ao aumento da pressão

**Fonte:** Devine (2000)

### 2.2.3 Princípio de funcionamento do RADAR

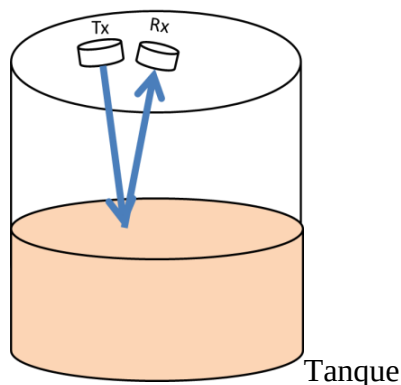
O RADAR teve sua evolução a partir da durante a Segunda Guerra Mundial. Seu princípio de funcionamento envolve a emissão de ondas eletromagnéticas pela atmosfera até que se tenha um obstáculo que provoque reflexão de parte do sinal transmitido. Este sinal é recebido por um receptor que pode estar junto ou não ao transmissor. Quando o sistema de transmissão (TX) e recepção (RX) integrarem o mesmo equipamento, tem-se o radar monoestático, que está representado na Figura 2.12.



**Figura 2.12** – Princípio do radar monoestático



ou com receptor separado do transmissor como no radar biestático como na Figura 2.13.



**Figura 2.13** – Princípio do radar biestático

Devido absorções, desvanecimento e atenuações no ambiente, o sinal recebido pelo receptor deve passar por um tratamento de compensação, tornando-se possível identificar distâncias, tamanho e velocidade do obstáculo.

O RADAR, hoje, tem sua aplicação não somente na detecção de objetos em movimento e estático, mas também para o mapeamento tridimensional de áreas agrícolas, radares meteorológicos, aplicações industriais etc (Nyfors, 2000). Novas tecnologias como o radar óptico e radar sem transmissão específica são citados na literatura como experimentos futuros.

#### 2.2.3.1 Equação do RADAR

No cálculo deste sistema são consideradas as variáveis como: a potência do transmissor ( $P_t$ ), o ganho da antena transmissora ( $G_t$ ), a área responsável pela geração do eco ( $\varphi$ ), a distância ( $R$ ), o ganho da antena receptora ( $G_r$ ) e a potência do sinal recebido ( $P_r$ ).

A equação clássica que representa um sistema de radar tem em sua forma básica:

$$S = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \cdot \frac{\varphi}{4\pi R^2} \cdot \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} = \frac{P_t G_t G_r \varphi \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2.16)$$

sendo,  $S$  [W] a potência do eco recebido,  $P_t$  [W] a potência do sinal transmitido,  $G_t$  o ganho da antena de transmissão,  $G_r$  o ganho da antena de recepção,  $\lambda$  [m] comprimento de onda,  $\varphi$  [m<sup>2</sup>] área responsável pelo eco e  $R$  [m] a distância entre o radar e a superfície responsável pelo eco.

O comprimento da onda  $\lambda$  [m] pode ser calculado com referência à velocidade de propagação da onda no vácuo (Ribeiro, 2004) e frequência da onda portadora:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad (2.17)$$

O primeiro fator da Equação 2.16 é relacionado à intensidade do sinal que chega ao obstáculo, considerando uma área superficial esférica dado por:

$$A = 4\pi r^2 \quad (2.18)$$

Na Equação 2.16 o segundo fator corresponde a área que produz o eco, o terceiro fator relacionado à área de recepção e ao comprimento de onda e ganho da antena na recepção (Berkowitz, 1966).

O alcance máximo  $r_{max}$  [m] determina a distância máxima para garantir o nível mínimo “limiar de recepção”, a que o circuito receptor poderá receber o eco sem que ocorra erro devido aos ruídos do circuito e do ambiente podendo ser calculado por:

$$r_{max} = \left[ \frac{P_t G^2 \lambda^2 \varphi}{(4\pi)^3 P_{rmin}} \right]^{\frac{1}{4}} = \left( \frac{P_t A_0^2 \varphi}{4\pi \lambda^2 P_{rmin}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.19)$$

## **CAPÍTULO 3 – SENSORES DE NÍVEL**

Quando se trata de sensor é necessário o entendimento de algumas características ligadas aos dispositivos de captação de dados, bem como o tipo de aplicação, o ambiente de operação e a influência das variações durante o processo de aquisição dos dados correspondente ao nível.

Para facilitar a compreensão das características específicas e vantagens do sensor de nível utilizando a tecnologia de radar FMCW, são apresentados de forma sucinta outros tipos e métodos empregados na medição de nível que utilizam dispositivos de rádio frequência sem contato com as substâncias empregadas em sistemas industriais.

### **3.1 Definição e características gerais dos sensores**

Os sensores são dispositivos utilizados para captação de dados provenientes de variações físicas, para cada tipo de variação é utilizado um tipo específico de sensor (Groover, 2011), fatores como temperatura, pressão e agressividade do ambiente podem influenciar nas medidas. Características como a exatidão, precisão, incerteza, sensibilidade devem ser observadas para que se tenha confiabilidade dos dados colhidos, (Souza e Bortoni, 2006), a faixa de leitura ou range adequado ao processo devem ser considerados para que se obtenham os dados mantendo suas características (Thomazini e Albuquerque, 2007).

Após processar estes dados conforme necessidade de cada processo passa-se a ter informações relativas a etapa monitorada.

No caso do sensor de nível por radar, a exatidão é influenciada por outros fatores como o tipo de aplicação, modelo de antena, software de processamento de ecos, etc (Divane, 2000).

### **3.2 Medição de nível**

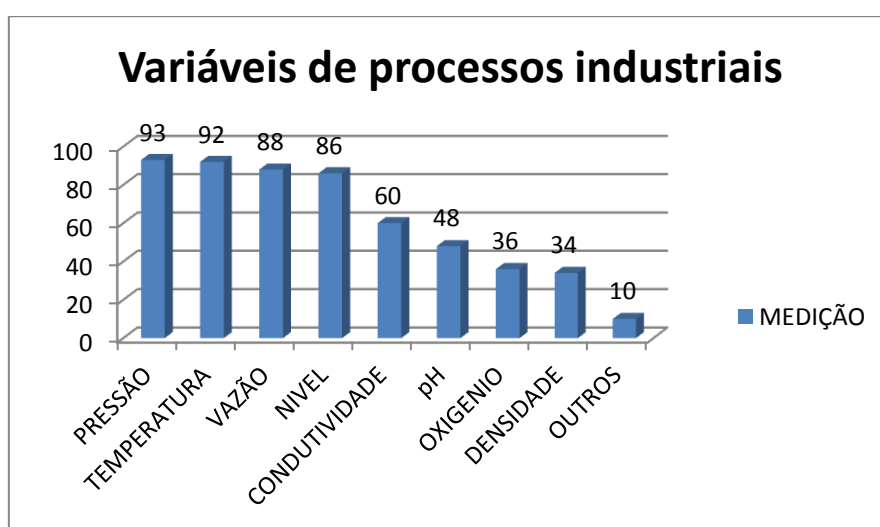
A medição de nível requer, por vezes, artifícios e técnicas apuradas. Em qualquer local em que se trabalhe com líquidos ou produtos secos, reservatórios, silos ou tanques de depósito para tratamento ou armazenamento de produtos, são empregados

os sensores de nível. Estes sensores servem para detectar o nível de enchimento e/ou esvaziamento em um processo.

Considerada a quarta medida mais utilizada em processos produtivos, o gráfico seguinte representa pesquisa efetuada no seguimento industrial.

O acompanhamento do nível em um processo é uma variável importante na indústria, não somente para a operação do próprio processo, mas também para fins de cálculo de custo e de inventário.

Os sistemas de medição de nível variam em complexidade, desde simples visores para leituras locais até indicação remota, registro ou controle automático.



**Figura 3.1** Pesquisa sobre utilização futura de transmissores em controle de processo

**Fonte:** Revista Control Engineering (2002)

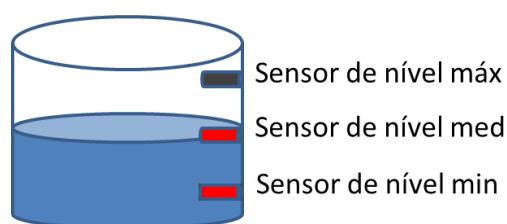
Têm-se como definição de nível, como sendo a altura do conteúdo de um reservatório, podendo ser líquido ou sólido. Também, como a determinação da posição de uma interface entre dois meios (Bega, 2003).

A escolha do método mais adequado a ser utilizado, começa pela identificação do produto a ser medido e qual o dispositivo adequado ao processo que será feita a coleta dos dados. Na indústria são utilizados vários métodos de aquisição de dados quanto ao nível conforme a tabela 3.1.

**Tabela 3.1-** Dispositivos de medida de nível contínuo

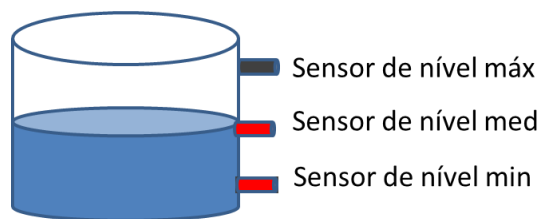
| <b>Medida continua do nível em líquidos</b> | <b>Medida contínua em sólidos e granulados</b> |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Radar                                       | Radar                                          |
| Radar de onda guiada                        | Radar de onda guiada                           |
| Ultrassônico                                | Ultrassônico                                   |
| Capacitivo                                  | Eletromecânico                                 |
| Radiométrico (Cs137 ou Co60)                | Radiométrico (Cs137 ou Co60)                   |
| Pressão Hidrostática                        |                                                |
| Pressão Diferencial                         |                                                |

Em relação a instalação dos sensores existem duas classes: a classe de contato a qual necessita que o dispositivo esteja em contato com a substância a ser medida, como exemplos temos: medidas por boias internas, Figura 3.2, chaves de nível eletromecânica, utilizado para medir carga de alto forno, etc...

**Figura 3.2** Medida de nível com boias internas em contato com o produto

Outra classe é a dos sensores que não têm contato com a substância a ser medida, onde se tem dispositivos instalados externamente na parede do tanque, Figura 3.3, ou dispositivos que trabalham com emissão de ondas magnéticas e feixes óticos instalados internamente no topo do tanque, como será apresentado posteriormente neste trabalho.

Os sensores também podem ser classificados quanto à captura de dados; uma classe é a discreta, onde se faz a tomada de dados por amostragens, em tempo determinado ou pela presença ou não da substância, Figura 3.2 e Figura 3.3.



**Figura 3.3** Medida com sensores de presença sem contato físico

Outra classe é a dos sensores de medida contínua, a qual possibilita o acompanhamento em tempo real do nível da substância.

As técnicas atualmente empregadas em dispositivos de medição de nível disponíveis no mercado são: capacitiva, boia magnética, transmissor de pressão manométrica ou diferencial, ultrassônico, radar e laser.

### *3.2.1 Sensores de nível sem contato*

O sensor de nível sem contato físico com os materiais, com os quais se deseja realizar a medição, tem vantagens em relação aos sensores de contato. Entretanto a escolha do tipo a ser utilizado deve ser passada por uma análise criteriosa quanto às influências do ambiente (Tabela 3.2), processo produtivo (Tabela 3.3), características químicas e físicas do material, condições de acesso para instalação e manutenção (Souza e Bortoni, 2006).

Algumas diferenças entre os sensores ultrassônicos, micro-ondas e laser são: a frequência de operação, condições do ambiente e características do material que provocam variações no sinal de leitura. Os três sistemas podem trabalhar utilizando a reflexão do sinal gerado pelo transmissor tendo seu funcionamento muito parecido.

Alguns tipos de interferências geradas no ambiente podem afetar a aquisição de dados pelos sensores. Dependendo do nível de interferência, a instalação de outros sensores auxiliares, tais como sensor de temperatura e pressão, devem ser utilizados para captar estas variações utilizando estes dados durante o processamento, como fatores de correção, mantendo a leitura do nível compatível com a realidade.

Existem casos em que a fonte de interferência inviabiliza algumas formas de coleta de dados. A exemplo tem-se a geração de espúrios elétricos ocasionados por motores e geradores que influenciam diretamente no sinal de um sensor ultrassônico (Bega, 2003). Para estes casos deve-se optar pela utilização de outro tipo de sensor.

**Tabela 3.2** – Comparativo interferências do ambiente nos sensores de nível sem contato

| Item | Tipo do sensor | Interferências do ambiente |          |                  |
|------|----------------|----------------------------|----------|------------------|
|      |                | Temperatura                | Humidade | Campos elétricos |
| 1    | Ultrassônico   | M                          | B        | A                |
| 2    | Micro-ondas    | B                          | M        | B                |
| 3    | Laser          | I                          | B        | I                |

A alta; M média; B baixa; I isento.

**Fonte:** Bega (2003)**Tabela 3.3** – Comparativo de desempenho e aplicação de sensores de nível

|              | Líquidos | Interface Líquido/ líquido |          | Espuma  |          | Polpa / pastoso |          | Partículas em suspensão |          | Granulados |          |
|--------------|----------|----------------------------|----------|---------|----------|-----------------|----------|-------------------------|----------|------------|----------|
|              | Contínuo | Pontual                    | Contínuo | Pontual | Contínuo | Pontual         | Contínuo | Pontual                 | Contínuo | Pontual    | Contínuo |
| Laser        | 1        | 2                          | 2        | 3       | 3        | 3               | 3        | -                       | -        | -          | -        |
| Micro-ondas  | 1        | -                          | -        | -       | -        | 1               | 1        | -                       | -        | 1          | 1        |
| Ultrassônico | 2        | 2                          | 2        | -       | -        | 1               | 2        | 1                       | 1        | 2          | 2        |

1-ótimo; 2- bom; 3- regular

**Fonte:** Liptak (2003)

### 3.2.1.1 Sensor de nível por ultrassom

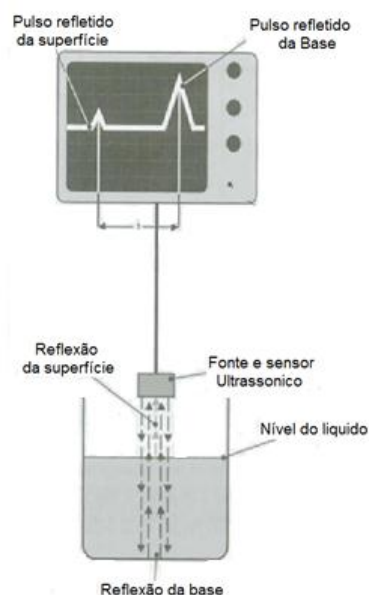
O funcionamento do dispositivo ultrassônico se faz por meio da geração das ondas ultrassônicas a partir de transdutores piezelétricos que, possuem oscilador a cristal, capaz de produzir sinais na faixa do ultrassom, para ser usado como transdutor, o quartzo e a turmalina, cristais piezelétricos naturais devem ser cortados de forma que um campo elétrico alternado, quando neles aplicado, produzam variações em sua espessura.

Descoberto por Pierre e Jacques Curie em 1880, o efeito piezelétrico consiste na variação das dimensões físicas de certos materiais sujeitos a campos elétricos. O contrário também ocorre, ou seja, a aplicação de pressões. Por exemplo, pressões acústicas que causam variações nas dimensões de materiais piezelétricos provocam o aparecimento de campos elétricos neles.

O sensor ultrassônico tem como funcionamento a lei da ótica. Figura 2.3. “O ângulo de incidência da onda é igual ao seu ângulo de reflexão” (Bega, 2003).

Sua aplicação em sensores de nível que utilizam ultrassom por SONAR, também conhecido por técnica do eco, são muito utilizados em plantas industriais (Bega, 2003) e tem funcionamento similar ao utilizado pelos sensores de micro-ondas por radar, utilizando modulação por chaveamento da portadora, cuja frequência é na faixa de ultrassom de 16kHz a 20MHz, que se propagam tomando por referência a velocidade do som 344 m/s no ar a 20°C.

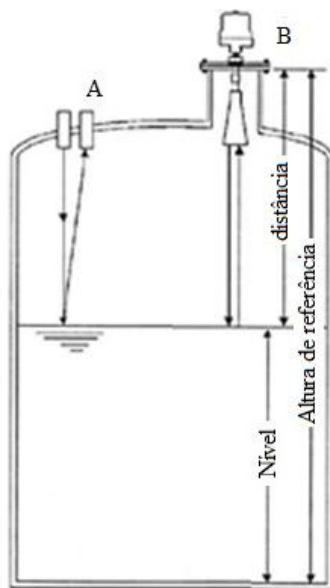
Utilizado em sistemas que se deseja identificar diversos níveis de substâncias em diferentes meios de propagação simultâneos, são utilizados em silos e tanques de armazenamentos de grãos, pós e líquidos a exemplo da Figura 3.4.



**Figura 3.4** Funcionamento do sensor ultrassônico

Os sensores ultrassônicos podem ser instalados de várias maneiras. Destacam-se, para fins de comparação, as instalações na parte superior (A) com transmissor e receptor separados e (B) com receptor e transmissor juntos (Figura 3.5).





**Figura 3.5** – Tipos de instalação dos sensores ultrassônicos

**Fonte:** Bega (2003)

As ondas ultrassônicas geram pressão acústica no meio de propagação podendo ser determinada pela Equação 3.1.

$$P_a = P_A \text{ sen}(2\pi ft) \quad (3.1)$$

Sendo:

$P_a$  = pressão adicional à pressão hidrostática ( $P_h$ ) ambiente;

$P_A$  = pressão de amplitude máxima da onda;

$f$  = frequência da onda ( $> 16 \text{ KHz}$ );

$t$  = tempo.

A intensidade das ondas ultrassônicas pode ser atenuada devido a vibração das moléculas do meio de propagação. Essa atenuação pode ser calculada pela Equação 3.2.

$$I = I_0^{(-2\alpha d')} \quad (3.2)$$

Sendo:

$I$  = intensidade do sinal ultrassônico atenuado;

$I_0$  = intensidade da fonte de radiação ultrassônica;

$\alpha$  = coeficiente de absorção;

$d'$  = distância a partir da fonte de emissão ultrassônica.

Sabendo-se que o coeficiente de absorção tem relação com a viscosidade e com a condutividade do meio, representada pela Equação 3.3, deduzida por Kirchoff, percebe-se, a influência da temperatura na propagação ultrassônica. Torna-se necessária a utilização de um sensor térmico para fornecer dados para correção da leitura feita pelo sensor ultrassônico (Martines, 2000).

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho c^3} \left[ \eta_b + \frac{4}{3} \eta_s + \frac{(\gamma - 1)k'}{C_p} \right] \quad (3.3)$$

Onde:

$\eta_s$  = força de cisalhamento;

$\eta_b$  = viscosidade da cavidade;

$k'$  = condutividade térmica do meio;

$C_p$  = calor específico à pressão constante;

$\gamma$  = capacidade calorífica

O sensor de nível por ultrassom sempre deve trabalhar com sensores de pressão e temperatura para que se façam eventuais correções na leitura de nível devidas alterações térmicas, pressão e viscosidade.

### 3.2.1.2 Sensor de nível por Laser

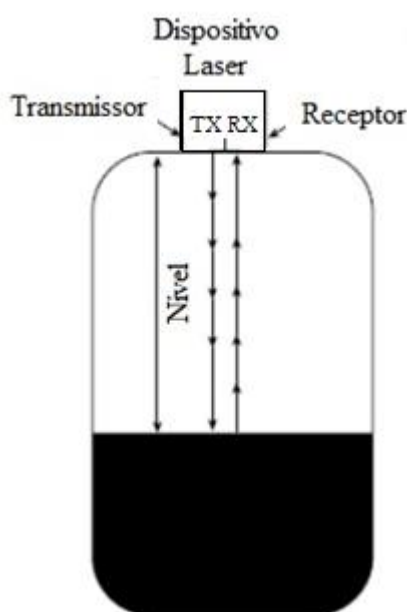
O laser surgiu no início da década de 60 como mais uma das contribuições da física quântica para a tecnologia. A palavra laser é o acrônimo de *light amplification by simulated emission of radiation*, em português: “amplificação da luz por emissão estimulada de radiação”. O feixe de luz produzido por um laser é monocromático, pois as linhas espectrais produzidas por ele são muito mais estreitas se comparado a uma lâmpada incandescente, como pode ser observado na Figura 3.6. Assim, o laser tem uma faixa muito pequena de comprimentos de onda, baixo espalhamento; a geração de suas ondas é coerente, ou seja, em fase.



**Figura 3.6** – Espectro contínuo e espectro discreto do laser

**Fonte:** Bagato (2001)

A faixa espectral do laser é desde a infravermelha (centenas de terahertz) até a luz visível. Como o feixe óptico obedece às equações de Maxwell, a ele aplicam-se as leis da difração, refração e reflexão. Logo, um dispositivo pode ser usado como sensor de nível em silos e tanques para materiais sólidos e líquidos. (Figura 3.7)



**Figura 3.7** – Funcionamento do sensor laser como reflexão

**Fonte:** Liptak (2003)

O sistema de medição de nível por laser pode ser feito por três processos: sistema por pulso, onda continua (modulação por frequência) e por triangulação; cada um aplicado conforme a adequação do processo e ao ambiente, a distância entre o sensor e a superfície a ser medida pode ser calculada por:

$$D = \frac{(c T)}{2} \quad (3.4)$$

Considerando  $D$  como distância [m] do sensor Laser até a superfície,  $c$  velocidade da luz [m/s] correspondente ao ambiente e  $T$  tempo de propagação [s] do pulso do laser.

Caso se tenha no ambiente gases ou vapor, deve ser considerado o índice de refração relacionado às propriedades químicas e físicas do gás ou vapor que poderão influenciar na velocidade da luz  $c$  [m/s] que ao ser relacionada com a velocidade da luz no vácuo  $c_0$  irá determinar o índice de refração para o gás /vapor  $N$  o qual pode ser obtido pela equação 3.5.

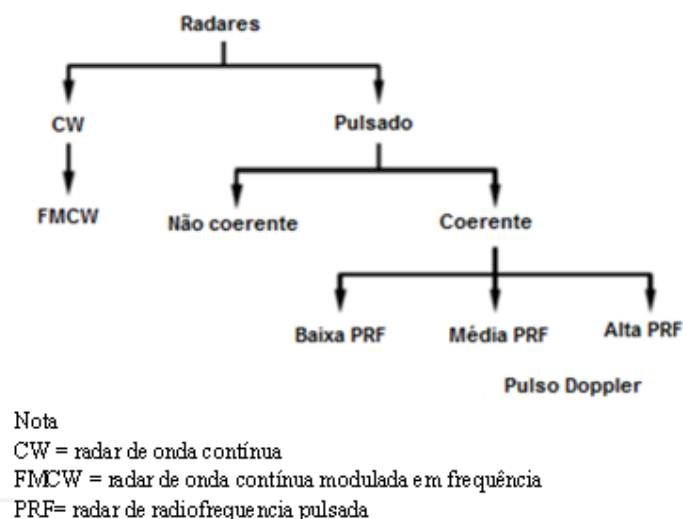
$$c = \frac{c_0}{N} \quad (3.5)$$

### 3.2.1.3 Sensor de nível por micro-ondas

Os sensores de nível que utilizam as tecnologias aplicadas em radares passaram a ser desenvolvidos a partir de diversas técnicas, a tecnologia de medição com micro-ondas empregando radar foi desenvolvida a partir de 1904 (Reitz et al, 1980) para aplicações em navegação, localização e medição de velocidade. Este procedimento passou a ser empregado em medições industriais de nível, devido à necessidade de sistemas que fossem adequados as condições internas de silos e tanques.

Atualmente existem várias tecnologias aplicadas ao RADAR, diferenças ligadas a onda portadora e sua modulação (Figura 3.8); Existem duas classes bem definidas de radares: onda contínua modulada em frequência (FMCW) e onda pulsada com modulação em amplitude (Sack, 2005).

O tipo de modulação deve ser considerado à aplicação na qual se quer obter a medida. Tais medidas podem ser: de velocidade, localização, distância e nível.

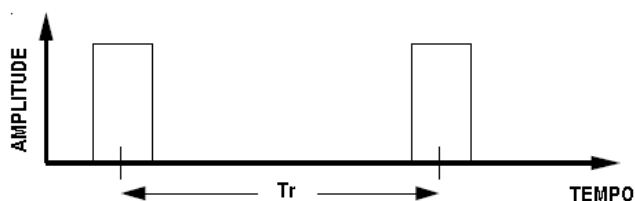


**Figura 3.8** – Tipos de modulação de RADAR

Fonte: Jenn (2003)

#### 3.2.1.3.1 Radares de onda pulsada

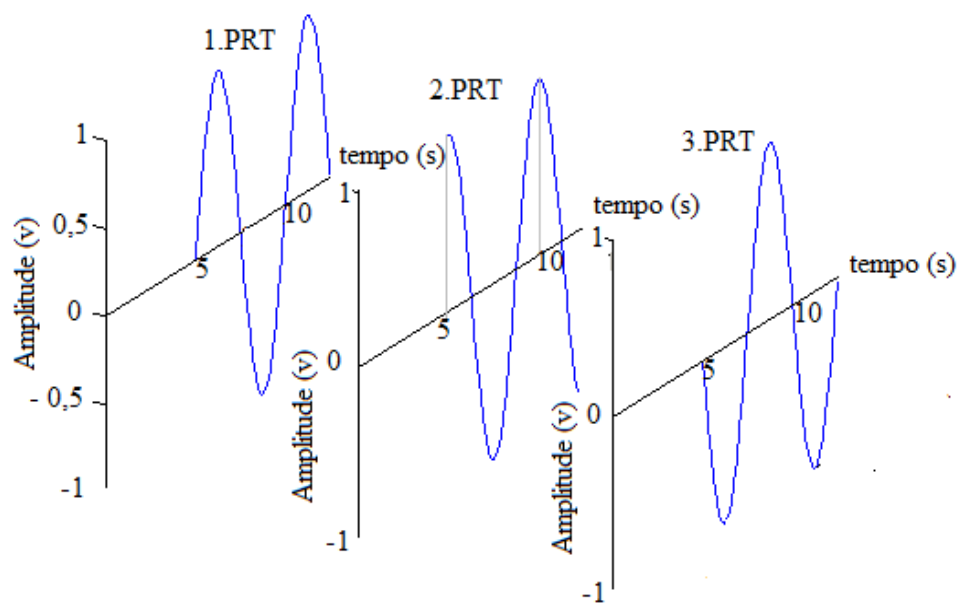
A modulação do radar pulsado é feita em amplitude, com a presença de uma janela de modulação, na qual o transmissor é habilitado, em oposição à habilitação do receptor, que é habilitado para receber o sinal refletido no momento em que o transmissor está desabilitado. Figura 3.9, neste tipo de modulação consegue-se um bom isolamento evitando a realimentação do sinal transmitido em relação ao recebido, devendo ser considerado o dispositivo de chaveamento como parte crítica para o desempenho deste tipo de modulação.



**Figura 3.9** – Sinal modulante para radar pulsado

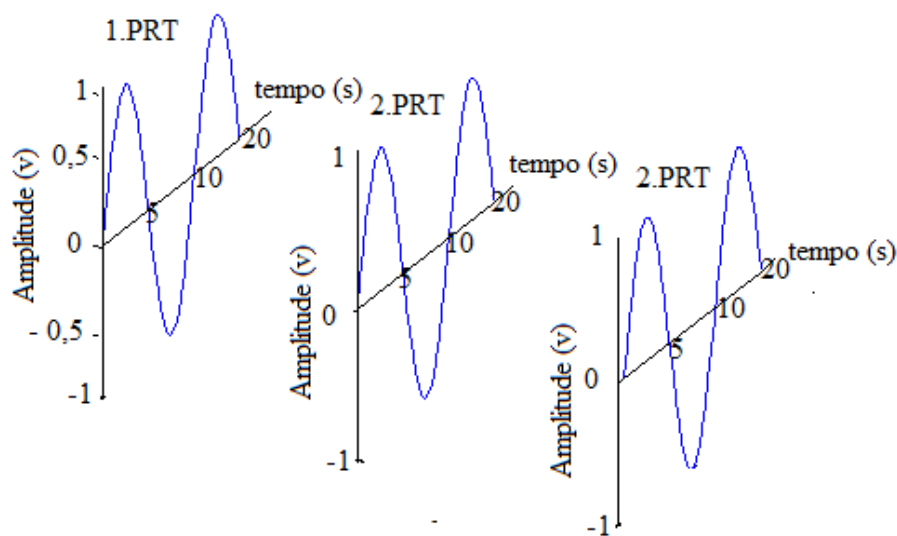
Fonte: Jenn (2003)

No radar com portadoras não coerentes, são utilizadas portadoras de fases aleatórias durante a janela de transmissão, como na Figura 3.10.



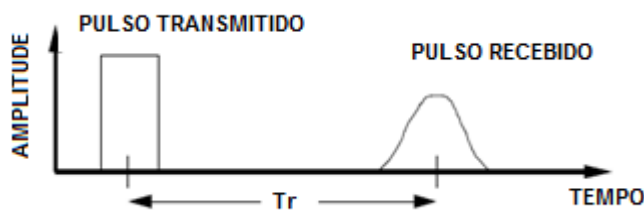
**Figura 3.10** – Portadoras de RADAR não coerentes

Nos radares de onda pulsada de portadoras coerentes, são utilizadas portadoras com mesma fase, Figura 3.11, durante a janela de transmissão.



**Figura 3.11** - Portadoras de RADAR coerentes

O sinal gerado, após a transmissão, sofre deformação durante sua propagação devido influências do ambiente, Figura 3.12. Tais deformações devem satisfazer os níveis necessários para uma recepção e decodificação correta.



**Figura 3.12** – Sinal gerado e recebido após ser rebatido e degradado

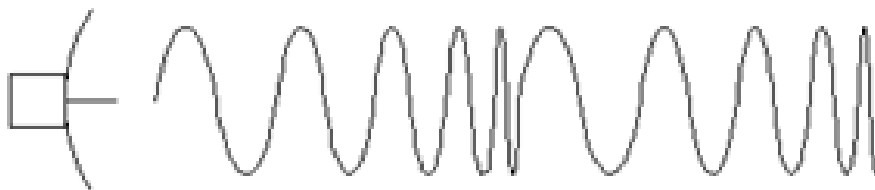
**Fonte:** Jenn (2003)

### 3.2.1.3.2 Radar de onda contínua modulado em frequência (FMCW)

O sistema radar FMCW foi desenvolvido em 1930 e teve sua aplicação relacionada aos radares altimétricos utilizados pela aviação. A faixa de frequência operacional dos radares pode variar de 3 a 30 GHz.

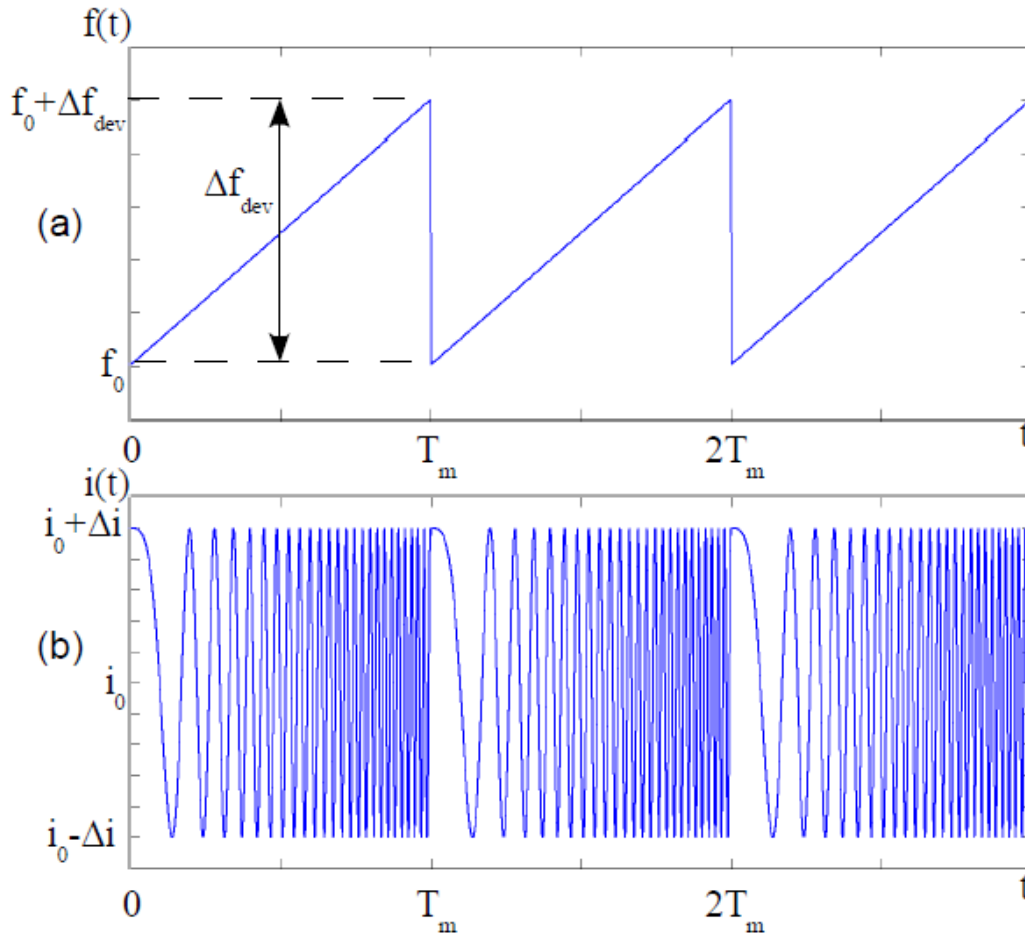
O radar de onda contínua tem como característica a transmissão ininterrupta de uma onda portadora; característica considerada como desvantagem em relação aos radares que trabalham com sistemas pulsado devido o aumento do consumo elétrico pela transmissão contínua da portadora.

A portadora é modulada em frequência por um sinal que possui características bem definidas (Figura 3.13). A partir desta modulação é possível transmitir a portadora modulada a qual será refletida por um obstáculo. O sinal refletido é recebido e demodulado, obtendo-se o sinal que é comprado ao modulante no mesmo instante. No RADAR FMCW invés de se considerar o tempo de trânsito, avalia se a diferença de frequência entre o sinal transmitido e o sinal de retorno o que torna possível a definição da distância do obstáculo que causou a reflexão do sinal (Bega 2003).



**Figura 3.13** – Sinal modulado em frequência

**Fonte:** Jenn (2003)



**Figura 3.14** – Geração do sinal FMCW

**Fonte:** Castillo (2009)

O princípio de funcionamento do radar FMCW apresentado na Figura 3.14, pode ser modelado matematicamente considerando a expressão do sinal senoidal enviado (3.7) (Castillo, 2009).

$$f_1(t) = f_0 + Kt \quad (3.6)$$

Para :  $0 \leq t \leq T_m$

$$S(t) = S_0 \cos \left[ 2\pi \int_0^t f_1(\tau) d\tau + \varphi_0 \right] = S_0 \cos \left[ 2\pi \left( f_0 t + \frac{K}{2} t^2 \right) + \varphi_0 \right] \quad (3.7)$$

cuja  $f_1(\tau)$  aumenta linearmente com o tempo, sendo considerado  $S_0$  a amplitude do sinal emitido [V],  $f_0$  a frequência inicial [Hz],  $\varphi_0$  fase inicial [rad] e  $K$  índice de modulação.



O sinal de retorno é descrito por

$$S_R(t) = \Gamma S_0 \cos \left[ 2\pi \left( f_0(t - t_0) + \frac{K}{2}(t - t_0)^2 \right) + \varphi_0 + \varphi_1 \right] \quad (3.8)$$

e ocorre após a reflexão na superfície do material. Os valores envolvidos são: o coeficiente de reflexão do obstáculo  $\Gamma$ , o tempo de ida e volta do sinal  $t_0$  [s] e a fase da resposta referente ao obstáculo  $\varphi_1$  [rad].

Realizando a mixagem do sinal enviado com o sinal recebido

$$S_{RM}(t) = S(t) \cdot S_R(t) \quad (3.9)$$

Após a mixagem utiliza-se um filtro passa-baixa para a eliminação das componentes harmônicas, obtendo-se como resultado a frequência correspondente à distância do obstáculo.

$$f = K t_0 = \frac{2K}{c} d_0 \quad (3.10)$$

Sendo:

$c$  = velocidade da luz

$d_0$  = distância do obstáculo

$f$  = a frequência proporcional à distância do obstáculo

Em relação à Figura 3.14 temos índice de modulação  $K$  dado por 3.11.

$$K = \frac{\Delta f_{dev}}{T_m} \quad (3.11)$$

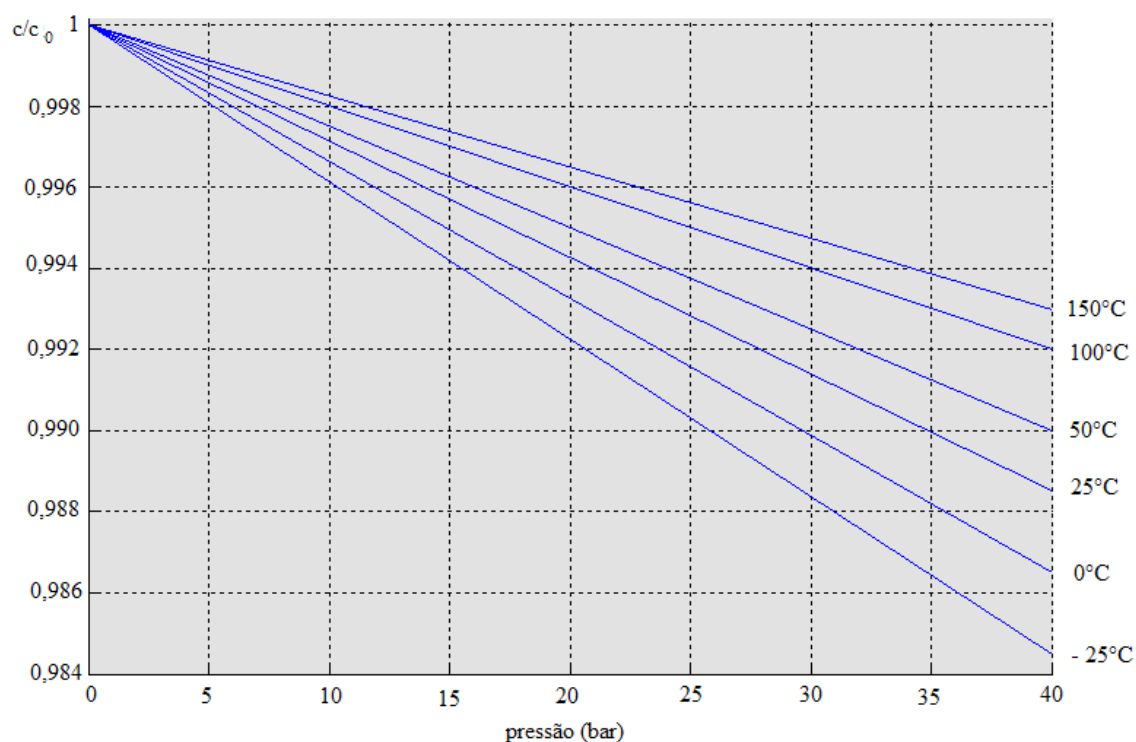
Substituindo 3.11 em 3.10 teremos a distância do obstáculo  $d_0$  [m] dado pela equação 3.12.

$$d_0 = \frac{c}{2} \frac{T_m}{\Delta f_{dev}} f \quad (3.12)$$

Segundo Brunbi (1995), em sistemas onde são utilizados tanques pressurizados pode ocorrer um pequeno desvio na medida do nível medido, devido a influência da temperatura e pressão na permissividade relativa, influência que pode ser calculada pela Equação 3.13.

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\varepsilon_{rN} - 1) \frac{273}{\theta} \frac{15P}{\theta}}} \quad (3.13)$$

Considerando para o cálculo da relação entre velocidade de propagação no meio e a velocidade de propagação no vácuo, é a permissividade do gás em condições normais  $\varepsilon_{rN}$ , a pressão  $P$  em bar e a temperatura  $\theta$  em Kelvin.

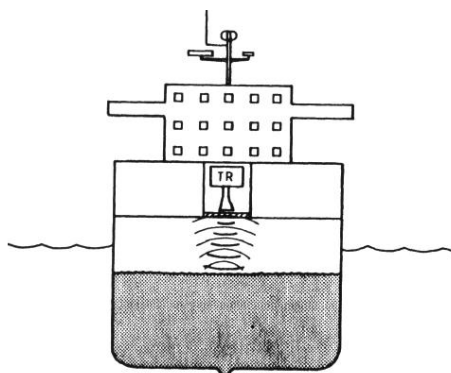


**Figura 3.15** – Gráfico da influência da temperatura e pressão sobre a velocidade de propagação considerando  $\varepsilon_{rN}=1,0006$

## CAPÍTULO 4 - SENSOR DE NÍVEL POR RADAR FMCW EM MICRO-ONDAS

Em 1970 o RADAR com modulação FMCW na faixa de micro-ondas passou a ser utilizado nos sensores de nível em navios petroleiros (Figura 4.1). Com o desenvolvimento de novos componentes eletrônicos e o avanço da automação industrial este tipo de sensor passou a ser utilizado em plantas industriais.

O sensor de nível por RADAR FMCW é utilizado em navios petroleiros, fábricas de cimento, siderúrgicas, mineradoras, etc.



**Figura 4.1** – Sensor em navio tanque

**Fonte:** Waldschmidt (2008)

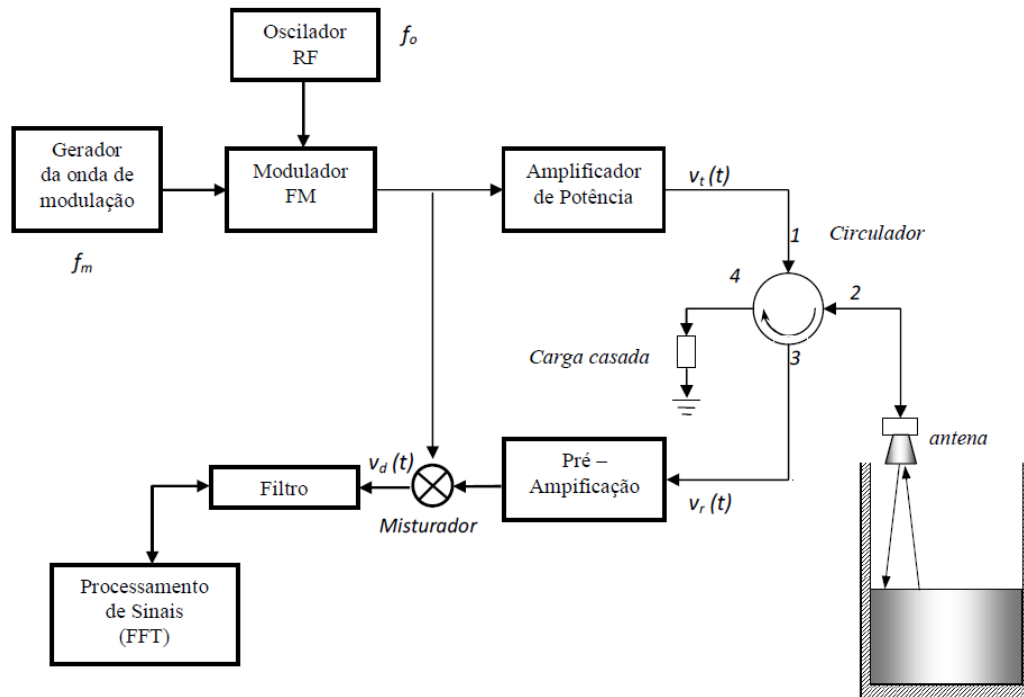
O sensor apresentado neste capítulo é do tipo sem contato, sem guia de ondas; são utilizados: um oscilador de onda portadora, um modulador em frequência, filtros passa faixa, circulador, isolador, amplificador sintonizado, comparadores, sintetizador, gerador de sinal modulante e antena.

Podem-se ter dois tipos de configuração relacionados à antena:

- Sensor com antena única a qual é utilizada para transmissão e recepção e
- Sensor com duas antenas sendo uma para transmissão e outra para recepção.

### 4.1 Sensor com antena única

Este sensor utiliza somente uma antena. O isolamento entre o sinal transmitido e recebido se faz utilizando um circulador de micro-ondas conforme Figura 4.2.



**Figura 4.2** – Diagrama em blocos do sistema com uma antena

**Fonte:** Bastos (2010)

#### 4.1.1 Componentes de um sistema de micro-ondas

##### 4.1.1.1 Antena

As antenas de micro-ondas são normalmente constituídas de um elemento irradiador básico, ligado ao sistema de alimentação (coaxial ou guia), denominado alimentador ou iluminador, e um refletor. (Barradas e Silva, 1978).

Para a escolha da antena devem ser consideradas as características:

##### A) Diretividade

Relação entre o campo irradiado pela antena " $E$ " em uma determinada direção e o campo que seria irradiado por uma antena isotrópica " $E_{iso}$ " (4.1) que recebe a mesma potência (Gomes, 1985).

$$D = \frac{E}{E_{iso}} \quad (4.1)$$

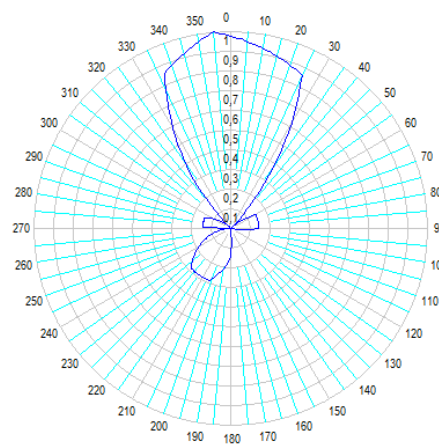
### B) Eficiência

A eficiência de uma antena pode ser obtida pela relação entre a potência realmente irradiada por uma antena e a potência a ela entregue pelo transmissor (4.2) (Gomes, 1985).

$$\eta = \frac{P_t}{P_r} \quad (4.2)$$

### C) Diagrama de irradiação

Um diagrama de irradiação é a representação gráfica da distribuição espacial das propriedades de radiação de uma antena, para o levantamento correto do diagrama utiliza-se uma fonte de transmissão conhecida e uma antena que se deseja realizar a diagramação. Durante este levantamento gira-se 360° a antena colhendo dados referentes ao nível do sinal recebido, níveis que podem ser plotados em um gráfico polar ou simulados em 3D por software específico representando o diagrama de irradiação da antena como demonstrada na Figura 4.3.



**Figura 4.3** – Diagrama de irradiação de uma antena parabólica

### D) Largura de Feixe ou Ângulo de abertura

Segundo Barradas e Silva, (1978) “Largura de feixe  $\phi$  de uma antena é definido como o ângulo entre os pontos que apresentam atenuação de 3dB em relação ao valor máximo do diagrama de irradiação da antena”, e pode ser calculado utilizando o comprimento de onda ( $\lambda$ ) e o diâmetro do refletor parabólico ( $d$ ) por (4.3)

$$\phi = 70 (\lambda/d) \quad (4.3)$$

### E) Tipos de antenas utilizados em sensores FMCW

São utilizadas nos sensores de micro-ondas algumas antenas específicas Figuras 4.4 e 4.5. A escolha da antena depende da área que se deseja cobrir pelo sensor e isso varia conforme o diagrama na Figura 4.6, sendo elas:

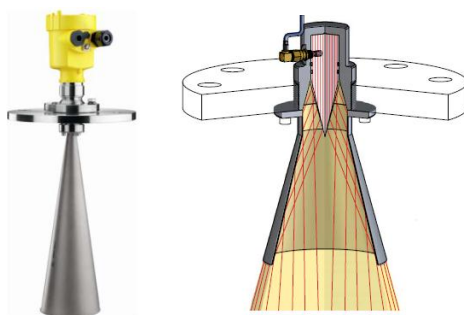
- Parábola



**Figura 4.4-** Sensor com antena Parábola

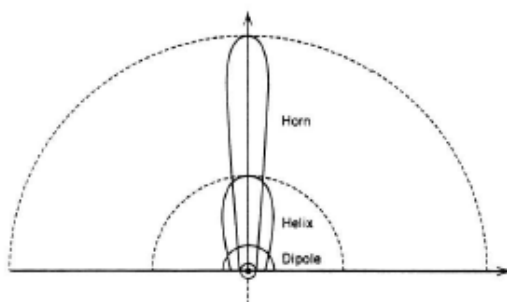
**Fonte:** Devine (2000)

- Horn ou Corneta



**Figura 4.5-** Sensor com antena Horn

**Fonte:** Devine (2000)

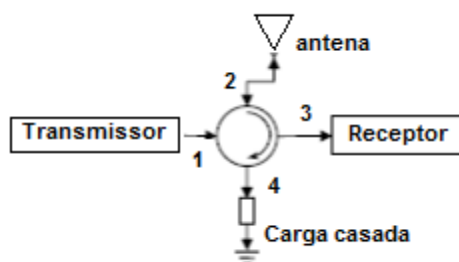


**Figura 4.6** – Diagrama de propagação comparativo das antenas Horn, Helicoidal e Parábola com dipolo.

**Fonte:** Waldschmidt (2008)

#### 4.1.1.2 Circulador de micro-ondas

O circulador utilizado em micro-ondas é um componente passivo e internamente possui um elemento de ferrita, composto de quatro portas; o sinal entra na porta  $i$  e sai pela porta  $i+1$ . A função do elemento ferrita é deixar passar o sinal em um sentido com a menor atenuação possível e atenuar de 30 dB o sinal reverso. A carga é utilizada para absorver qualquer sinal refletido do transmissor, conforme mostrado na Figura 4.7.

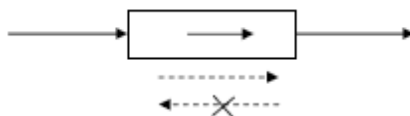


**Figura 4.7** – Circulador de micro-ondas

**Fonte:** Barradas e Silva (1978)

#### 4.1.1.3 Isolador

O isolador componente utilizado em micro-ondas com a finalidade de deixar passar todo o sinal no sentido direto, com a mínima interferência possível, e causar grande atenuação no sentido reverso, serve para proteção de sinais refletidos indesejavelmente na direção do transmissor, Figura 4.8.

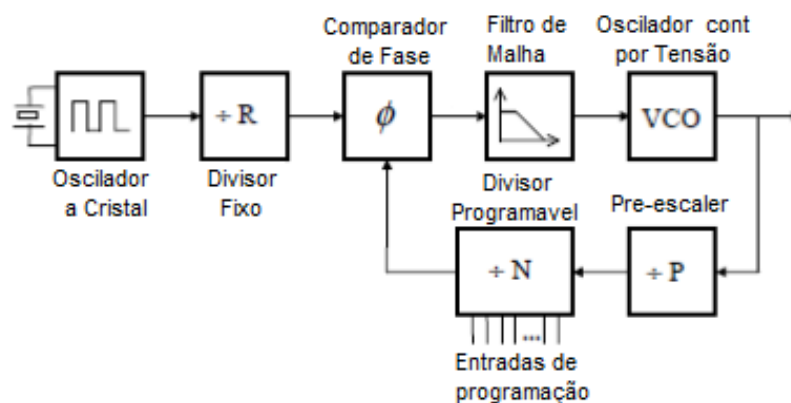


**Figura 4.8** – Isolador

**Fonte:** Barradas e Silva (1978)

#### 4.1.1.4 Oscilador de portadora

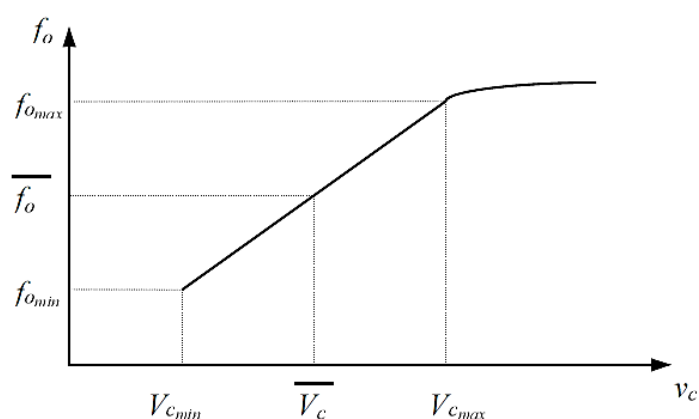
O oscilador da onda portadora tem como finalidade gerar um sinal senoidal, cuja frequência deve ser estável e pouco susceptível a variações térmicas. Para isso utiliza-se um oscilador a cristal como referência para garantir a estabilidade do VCO utilizando uma realimentação em loop, a fim de manter a estabilidade do oscilador da onda portadora, conforme Figura 4.9.



**Figura 4.9** – PLL de estabilização do oscilador VCO

**Fonte:** Panaro (2009)

O oscilador controlado por tensão (VCO) utiliza como elemento de controle um diodo varicap o qual varia sua capacitância interna conforme a tensão reversa aplicada em seus terminais, esta alteração capacitiva provoca a variação da frequência do oscilador .(Zhang, 2003). Variando a tensão de polarização do VCO tem-se a frequência relativa a esta variação, Figura 4.10.



**Figura 4.10** – Gráfico de resposta do oscilador VCO

**Fonte:** Panaro (2009)



#### *4.1.1.5 Gerador de onda dente de serra*

Visto que o sistema é FMCW, torna-se necessário obter uma variação na frequência da portadora, linearmente, com frequências e tempos de modulação bem definidos. Um gerador de onda dente de serra é utilizado como sinal modulante da portadora senoidal que será transmitido. A inclinação da rampa determinará o desvio da frequência da portadora, o período determina a velocidade do ciclo de varredura do modulador e a amplitude o desvio da frequência da portadora. O sinal recebido após a reflexão é demodulado sendo possível comparar o desvio entre o sinal modulante gerado e o recebido no mesmo momento, obtendo-se após a análise a distância entre o sensor e o obstáculo ou superfície a ser medida. As características deste sinal influenciarão diretamente no desempenho do radar FMCW.

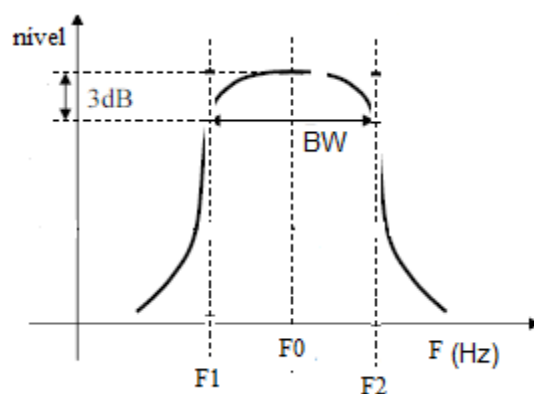
#### *4.1.1.6 Modulador em frequência*

A modulação em frequência pode ser feita por um circuito onde se tenha um sinal portador de boa estabilidade, que terá sua frequência deslocada a partir de um sinal modulante. Pode-se deslocar o sinal da portadora a partir de um oscilador VCO, no qual o elemento oscilador é um diodo varicap; alterando a polarização do diodo, ocorrerá uma variação da capacitância, gerando, assim, o deslocamento da frequência que irá funcionar como um modulador de frequência (Gomes, 1985).

#### *4.1.1.7 Amplificador sintonizado*

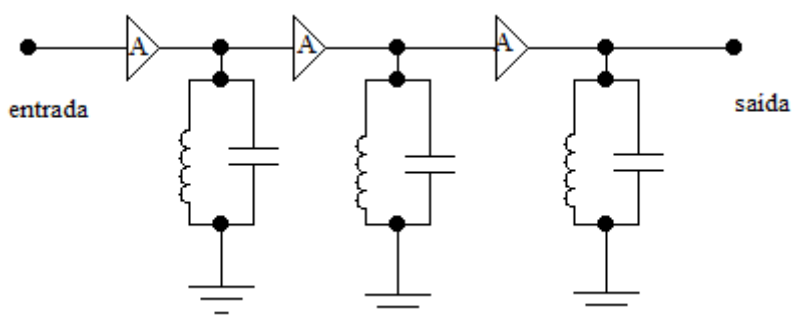
Amplificador sintonizado é um circuito cuja característica é a otimização do ganho de sinal em uma faixa de frequência para a qual foi projetado, servindo como um elemento de seleção de sinal.

Como sua característica, deve-se ter um ganho linear dentro da faixa de funcionamento (BW), tendo como referência a frequência inferior  $F_1$  e a frequência superior  $F_2$  no ponto de menos 3 dB da curva, conforme demonstrado na Figura 4.11. Obtendo-se estas características é possível trabalhar com ganhos pequenos para minimizar a geração de espúrios durante a amplificação.



**Figura 4.11** – Curva de resposta de um amplificador sintonizado

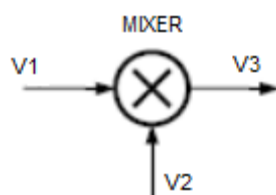
Em amplificadores de potência são utilizados amplificadores de baixo ganho em série ou paralelo. Em vez de se utilizar amplificadores de alto ganho de um estágio que apresentam muito ruído, utilizam-se vários amplificadores com baixo ganho reduzindo o ruído, acoplados a divisores e combinadores permitindo um alto ganho final. Circuitos sintonizadores na faixa de frequência são utilizados no acoplamento do sinal na entrada e saída permitindo otimizar o ganho do sinal somente na faixa de frequência que se deseja trabalhar.(Figura 4.12).



**Figura 4.12** – Amplificador sintonizado

#### 4.1.1.8 Misturador

Os misturadores são componentes utilizados para a conversão de frequências. Este dispositivo serve tanto como “*up-converter*” ou “*down-converter*”. Tais dispositivos possuem três portas sendo V2 para entrada de um oscilador local e V1 para o sinal a ser convertido, em sua saída V3. Pode-se obter a soma ou a subtração dos sinais aplicados à entrada (Figura 4.13) ( Barradas e Silva, 1978).



**Figura 4.13** – Misturador

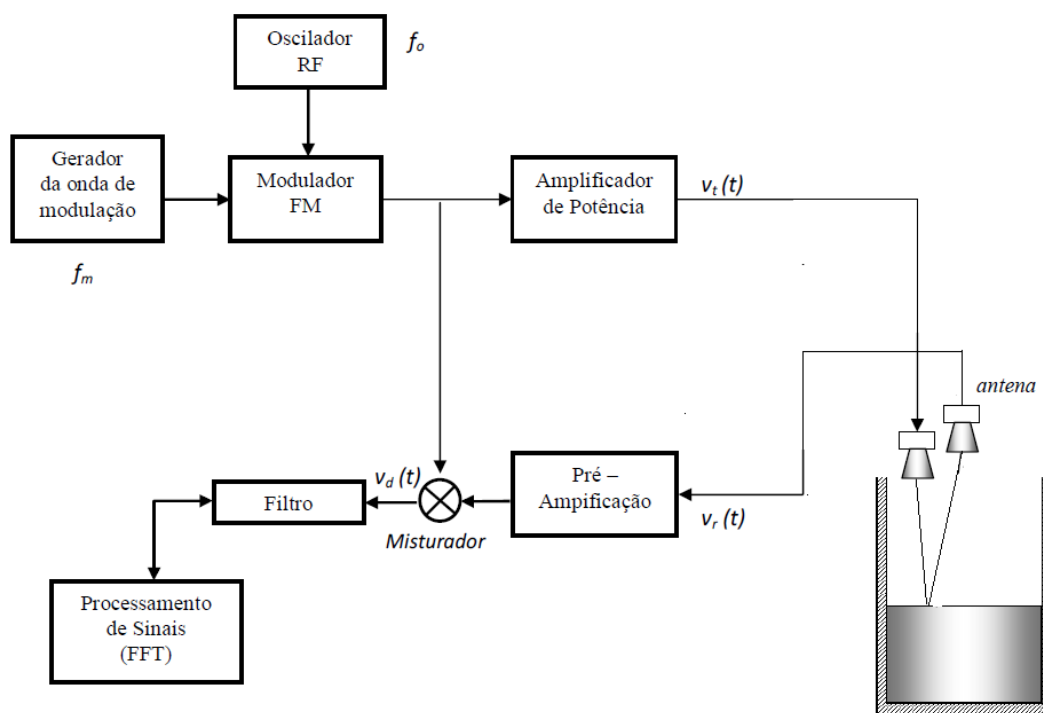
#### *4.1.1.9 Filtro*

Filtro de micro-ondas é utilizado para a seleção da faixa de operação, para isso um filtro do tipo passa faixa, é sintonizado na faixa de operação. Este filtro deve apresentar baixa perda de inserção, resposta plana e baixa atenuação na banda passante.

##### *4.1.1.9.1 Perda de inserção*

Essa característica está relacionada com a seletividade do filtro e com o fator de qualidade dos componentes utilizados. A utilização de mais de um filtro em cascata para a obtenção da seletividade desejada é um recurso empregado para a redução da perda de inserção. Um filtro composto por dois ressonadores acoplados, e projetado para fornecer uma seletividade igual à proporcionada por um único ressonador, possui uma perda de inserção menor, mesmo quando construído com os mesmos componentes. Normalmente os filtros utilizados em micro-ondas são feitos de guias de ondas sintonizadas, podendo ser utilizados filtros com processamento digital também.

## 4.2. Sensor com duas antenas



**Figura 4.14** – Diagrama em bloco do sistema com duas antenas

As diferenças do sistema apresentado na Figura 4.14 para o sistema anterior Figura 4.2 são:

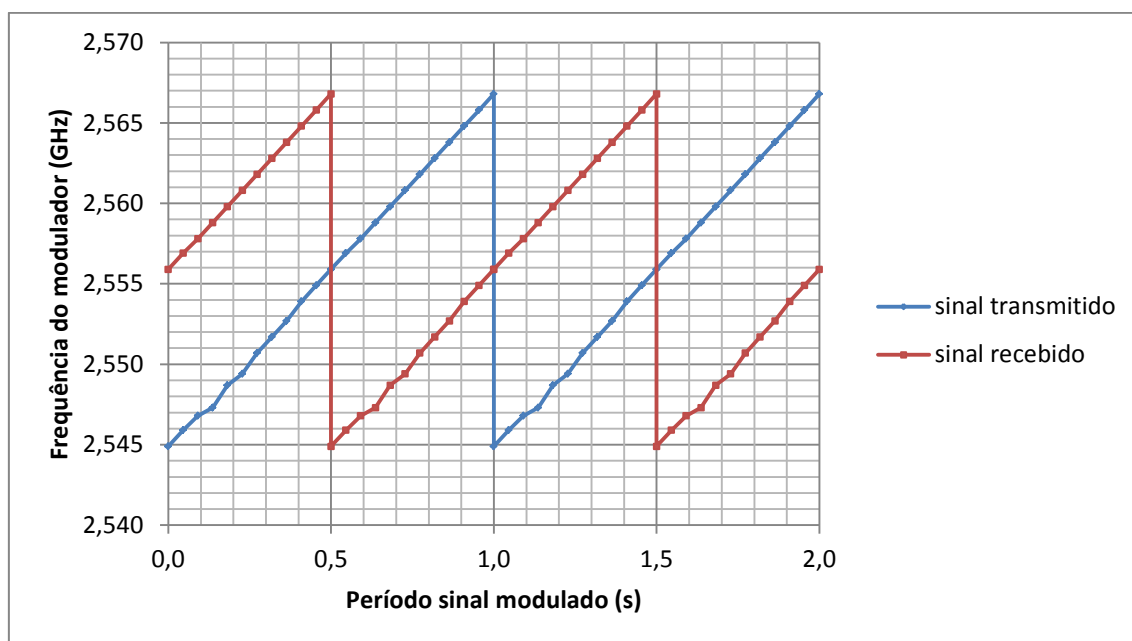
- a) A utilização de duas antenas separadas fisicamente para se conseguir uma isolamento entre a transmissão e a recepção já que a onda portadora trabalhará na mesma faixa, tanto para transmissão quanto para a recepção e
- b) Não é utilizado o circulador como componente de isolamento entre a transmissão e a recepção.

A frequência portadora é gerada por um oscilador de radiofrequência na faixa desejada. Os cuidados com a estabilidade de nível e frequência são de extrema importância para a confiabilidade do sensor; este sinal tem a frequência da portadora variada de acordo com um sinal modulante que pode ser um dente de serra ou um sinal cujo período e amplitude possam ser controlados, para que sejam correlacionados e comparados com o sinal recebido.

O circuito de recepção é composto por um pré-amplificador de alta sensibilidade e baixo ruído, e antena que recebe o sinal refletido pelo objeto ou superfície detectado.

Este sinal é misturado com o mesmo sinal que é gerado pelo oscilador de referência e comparado. A diferença de fase detectada é correlacionada à velocidade de propagação, à influência quanto à permissividade e a permeabilidade do material e do meio que provocaram a reflexão.

É necessário um processamento do sinal, que leve em consideração os fatores do ambiente eliminando ondas parasitas e reflexões indiretas, permanecendo somente o sinal principal (Figura 4.15).

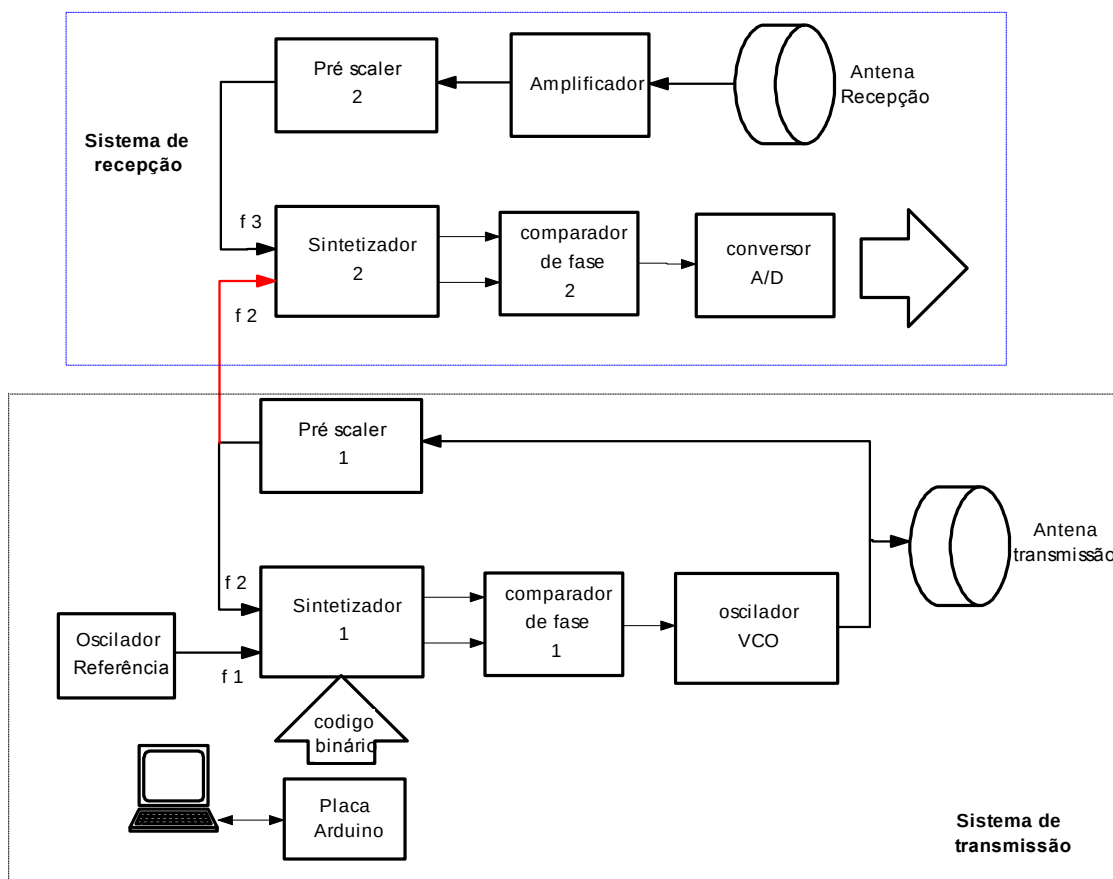


**Figura 4.15-** Sinal gerado e sinal de retorno após propagação

## CAPÍTULO 5 - DESENVOLVIMENTO E TESTES DO PROTÓTIPO

### 5.1 Desenvolvimento do protótipo

O protótipo do sensor de nível por radar FMCW, proposto para este trabalho, opera na faixa de micro-ondas de 2,5 GHz banda S, considerada micro-ondas baixa, com duas antenas: uma para transmissão e outra para recepção (Figura 5.1). A frequência mencionada foi escolhida devido ao fato de não haver disponibilidade de equipamentos para análise para a faixa de frequência de 60GHz, na qual operam alguns sensores industriais atualmente (Kuroki, 2009).



**Figura 5.1** – Diagrama do protótipo

O sistema de transmissão é composto por:

- Antena parabólica de transmissão;
- Oscilador de referência;

- Módulo ARDUINO utilizado na geração do sinal modulante;
- Sintetizador;
- Comparador de fase 1;
- Oscilador VCO;
- Pré-escaler 1.

O sistema de recepção é composto por:

- Antena parabólica de recepção;
- Amplificador;
- Pré-escaler 2;
- Sintetizador;
- Comparador de fase 2;
- Conversor A/D.

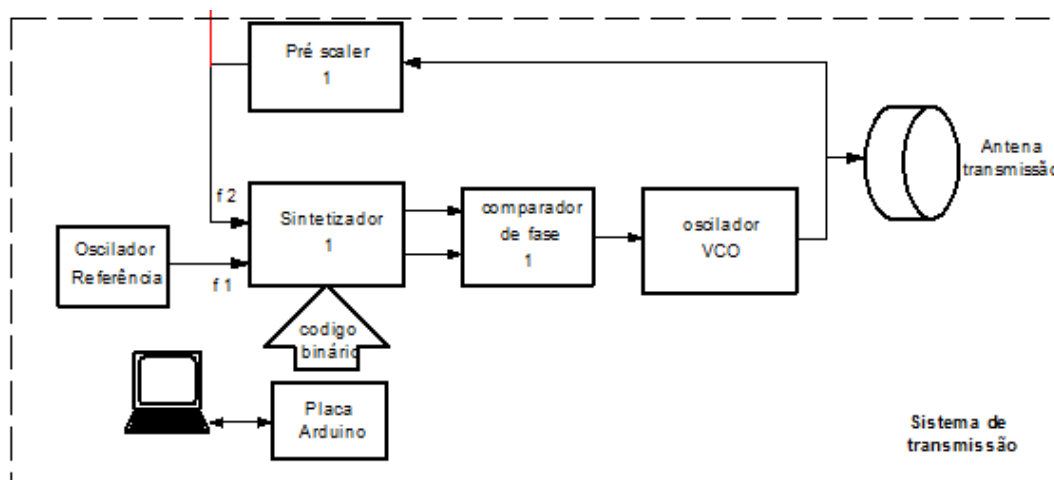
A fonte de alimentação utilizada alimenta o sistema de transmissão e recepção.

## **5.2 Descrição do funcionamento**

### *5.2.1 Fonte de alimentação*

O sistema é alimentado por uma fonte principal de 26 volts de corrente contínua estabilizada e de baixo *ripple*. , da fonte principal são obtidos outros valores de tensão utilizando reguladores de tensão necessários para funcionamento de cada módulo.

### 5.2.2 Sistema de transmissão



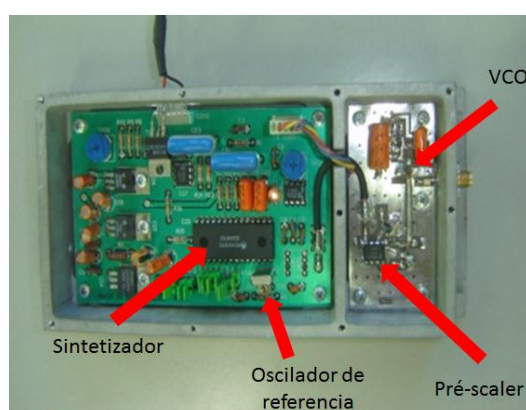
**Figura 5.2** – Diagrama do sistema de transmissão

O sistema de transmissão (Figura 5.2), utiliza um sinal senoidal como portadora na frequência de 2550 MHz e 7,5 dBm de nível, observado na tela do analisador de espectro (Figura 5.3). O sinal é gerado por um oscilador controlado por tensão VCO que utiliza um diodo varicap como elemento de controle do oscilador para alta frequência. A estabilidade da frequência da portadora é garantida utilizando um circuito PLL (*Phase Locked Loop*). O sistema sintetizado gera dois sinais em sua saída, os quais têm suas fases comparadas por um amplificador operacional que fornece uma tensão proporcional a diferença da fase que é enviada ao diodo varicap para correção da frequência do oscilador. O sintetizador utiliza um oscilador à cristal como referência e recebe um segundo sinal proveniente do pré scaler, que divide a frequência, de amostra do sinal gerado pelo diodo varicap (Figura 5.4), fechando o laço de realimentação.





**Figura 5.3** – Analisador de espectro



**Figura 5.4** – Módulo sintetizador e oscilador VCO

O sinal de saída do VCO é enviado para um amplificador de radiofrequência acoplado a antena parabólica de transmissão, que possui como alimentador um dipolo de meia onda.

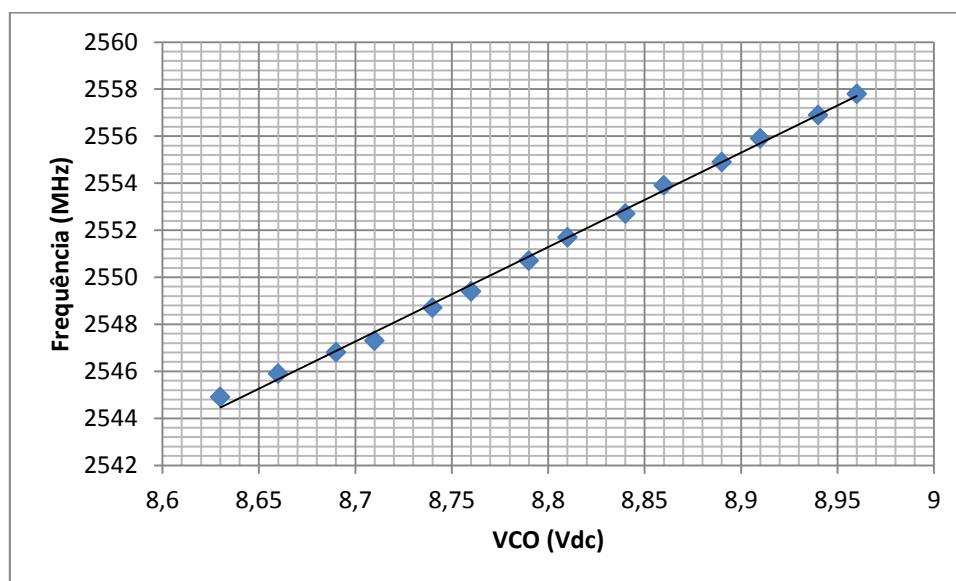
A modulação é feita adicionando ao VCO um sinal proveniente do módulo de modulação, que utiliza um circuito de processamento ARDUINO, controlado por um software que gera palavras binárias especificadas pelo usuário e tempo de apresentação de cada uma delas nas portas binária da placa. Estas palavras de 12 bits alimentam o divisor do sintetizador 1 causando o desvio da frequência proporcional à programação binária correspondente a palavra binária da saída do ARDUINO Tabela 5.1.

**Tabela 5.1** – Tensão de modulação do VCO gerada pelas palavras binárias originadas no ARDUINO

| Geração do sinal modulante pelo Arduino |            |             |      |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------------------------------|------------|-------------|------|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| Sintetizador                            |            | Programação |      |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |
| Tensão                                  | Frequência | 2048        | 1024 | 512 | 256 | 128 | 64 | 32 | 16 | 8  | 4  | 2  | 1  |
| Vdc                                     | MHz        | n11         | n10  | n9  | n8  | n7  | n6 | n5 | n4 | n3 | n2 | n1 | n0 |
| 9,19                                    | 2566,8     | 0           | 1    | 0   | 1   | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  |
| 9,16                                    | 2565,8     | 0           | 1    | 0   | 1   | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  |
| 9,14                                    | 2564,8     | 0           | 1    | 0   | 1   | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  |
| 9,11                                    | 2563,8     | 0           | 1    | 0   | 1   | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| 9,09                                    | 2562,8     | 0           | 1    | 0   | 1   | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  |
| 9,06                                    | 2561,8     | 0           | 1    | 0   | 1   | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  |
| 9,04                                    | 2560,8     | 0           | 1    | 0   | 1   | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  |
| 9,01                                    | 2559,8     | 0           | 1    | 0   | 1   | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 8,99                                    | 2558,8     | 0           | 1    | 1   | 0   | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 8,96                                    | 2557,8     | 0           | 1    | 1   | 0   | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| 8,94                                    | 2556,9     | 0           | 1    | 1   | 0   | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  |
| 8,91                                    | 2555,9     | 0           | 1    | 1   | 0   | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  |
| 8,89                                    | 2554,9     | 0           | 1    | 1   | 0   | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  |
| 8,86                                    | 2553,9     | 0           | 1    | 1   | 0   | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  |
| 8,84                                    | 2552,7     | 0           | 1    | 1   | 0   | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  |
| 8,81                                    | 2551,7     | 0           | 1    | 1   | 0   | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| 8,79                                    | 2550,7     | 0           | 1    | 1   | 0   | 0   | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  |
| 8,76                                    | 2549,4     | 0           | 1    | 1   | 0   | 0   | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  |
| 8,74                                    | 2548,7     | 0           | 1    | 1   | 0   | 0   | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  |
| 8,71                                    | 2547,3     | 0           | 1    | 1   | 0   | 0   | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| 8,69                                    | 2546,8     | 0           | 1    | 1   | 0   | 0   | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  |
| 8,66                                    | 2545,9     | 0           | 1    | 1   | 0   | 0   | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  |
| 8,63                                    | 2544,9     | 0           | 1    | 1   | 0   | 0   | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  |

O sinal gerado pelo ARDUINO é convertido em tensão, resultando em um sinal com níveis discretos conforme demonstrado no gráfico (Figura 5.5). Este sinal simula uma ondas dente de serra com amostragens discretas, com possibilidade de controlar o

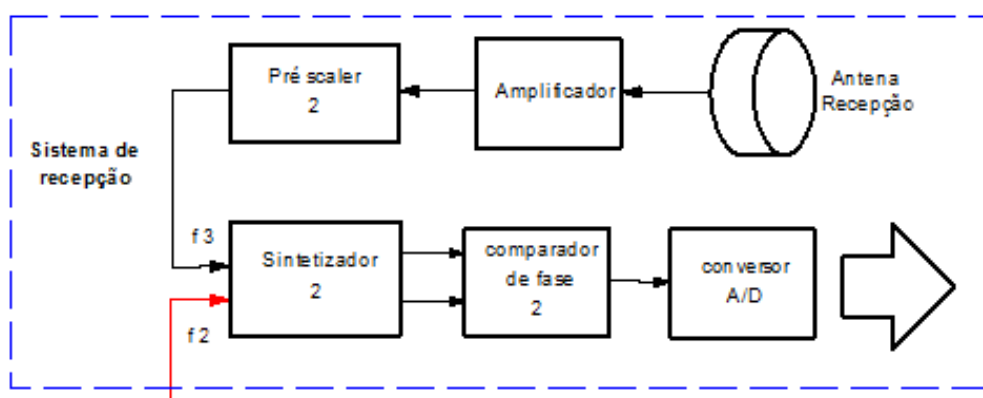
tempo de permanência de cada desvio de frequência; com isso espera-se ter um maior controle do sinal refletido.



**Figura 5.5** – Gráfico do sinal modulante

### 5.2.3 Sistema de recepção

O sistema de recepção (Figura 5.6) capta pela parábola de recepção o sinal refletido originado pelo sistema de transmissão. O sinal é amplificado por um amplificador de baixo ruído com o ganho de 22 dB, na sequência passa pelo circuito pré scaler 2, programado para se obter a mesma faixa de frequência para qual está programado o pré scaler do transmissor, o sinal é injetado no módulo comparador de fase, que recebe uma amostra de sinal do pré scaler 1 do transmissor que esta sendo gerado no momento pelo sistema de transmissão, a diferença de fase entre os dois sinais, depois de comparada pelo circuito integrado, fornecerá em sua saída um nível de tensão dc.



**Figura 5.6** – Diagrama do sistema de recepção

O resultado desta comparação corresponde à diferença de frequência e defasagem do sinal transmitido com o sinal recebido. Tal diferença corresponde ao tempo de propagação que poderá ser processado por aplicação de software específico indicando a distância do material que causou a reflexão do sinal, que no caso de um tanque, representará o nível do líquido.

### 5.3 Cálculo e confecção das antenas de recepção e transmissão

Foram confeccionadas duas parábolas de 14 cm de diâmetro com dipolos como iluminadores de meia onda. A opção de duas parábolas se deu a fim de se ter um isolamento externo entre o sinal do transmissor e o sinal de recepção.

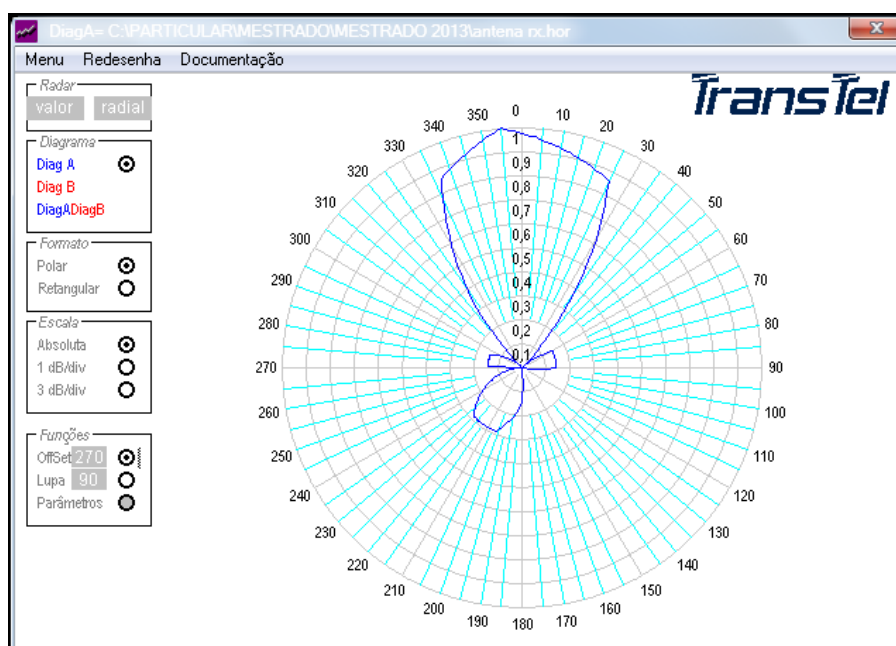
#### 5.3.1 Diagrama de irradiação da antena de recepção

Para se determinar o diagrama da antena de recepção foi efetuada a medição utilizando o oscilador da onda portadora como ponto de transmissão e antena de referência.



**Figura 5.7** – Antena de recepção com dipolo meia onda

A antena foi posicionada a 10 metros de distância da antena de transmissão, a 1,5 m, em um tripé, o qual possibilitou o deslocamento angular da antena proporcionando a diagramação. Para geração do diagrama foi utilizado o programa FadaWin. Obteve-se um ângulo de abertura de  $56^\circ$  a meia potência conforme diagrama da Figura 5.8.



**Figura 5.8** – Diagrama de irradiação da antena de recepção

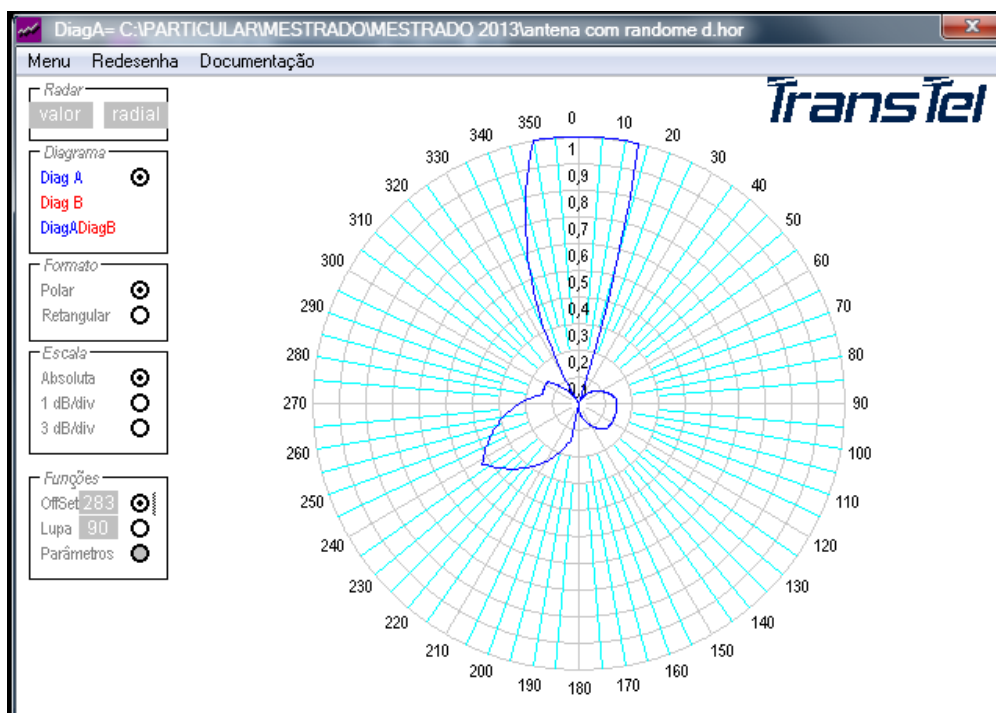
### 5.3.2 Diagrama de irradiação da antena de transmissão

O tamanho do dipolo utilizado na antena de transmissão é o mesmo utilizado para antena de recepção, entretanto na de transmissão foi utilizado um Radome (Figura 5.9) para concentrar o lóbulo principal da antena, diminuir a área de incidência de reflexão e aumentar o ganho da parábola.



**Figura 5.9** – Antena de transmissão com Radome

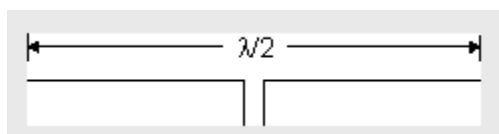
Foi utilizado o oscilador gerando a portadora como ponto de transmissão e antena de referência. Apresentando um ângulo de abertura de  $32^\circ$  a meia potência conforme diagrama da Figura 5.10.



**Figura 5.10** – Diagrama de irradiação da antena de transmissão

### 5.3.3 Cálculo do dipolo

As antenas de recepção e transmissão tem como elemento ativo o dipolo de meia onda (Figura 5.11) utilizado como alimentador.



**Figura 5.11** – Dipolo meia onda

Cálculo do período

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2550 \cdot 10^6} = 3,9210^{-10} \text{ [s]} \quad (5.1)$$

Cálculo do comprimento de onda

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{2550 \cdot 10^6} = 0,1176 \text{ [m]} = 11,76 \text{ [cm]} \quad (5.2)$$

Cálculo do dipolo de meia onda

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{11,76}{2} = 5,88 \text{ [cm]} \quad (5.3)$$

#### 5.3.4 Cálculo do ganho da antena parabólica

Ganho em decibels (dBd) do refletor para eficiência de 65%, considerando diâmetro do refletor  $d$  em metros e o comprimento de onda  $\lambda$  em metros pode ser calculado por:

$$G_{(dBd)} = 7,7 + 20 \log(d/\lambda) \quad (5.4)$$

$$G_{(dBd)} = 7,7 + 20 \log\left(\frac{0,14}{0,1176}\right)$$

$$G_{(dB)} = 9,21 \text{ [dBd]}$$

Com os valores obtidos nos experimentos utilizando o protótipo, foi possível obter o diagrama de irradiação com os valores reais dos ângulos de abertura. Desta forma, tem-se para a antena de transmissão um ângulo de abertura de  $32^\circ$  proporcionado pelo radome utilizado e uma antena equivalente a uma parábola de 25,73 cm de diâmetro resultando em um ganho de 14,5 dBd. No caso da antena de recepção, considerando o diagrama de irradiação, obteve-se um ângulo de abertura de  $53^\circ$ , representando uma antena de 15,5 cm, obtendo um ganho de 10 dB, valores reais diferentes dos calculados teoricamente pela equação 5.4.

### 5.3.5 Cálculo da largura de feixe

Cálculo da largura de feixe  $\theta$  em graus, relacionado ao ponto de meia potência.

$$\begin{aligned}\theta &= 70 (\lambda/d) \\ \theta &= 70 (0,1176/0,14) \\ \theta &= 58,8^\circ\end{aligned}\tag{5.5}$$

Analisando os diagramas de irradiação figura 5.8 e 5.10 observa-se um valor real para o ângulo de abertura da antena de recepção igual a  $53^\circ$  e um valor de  $32^\circ$  para a antena de transmissão.

## 5.4 Módulo do oscilador de portadora

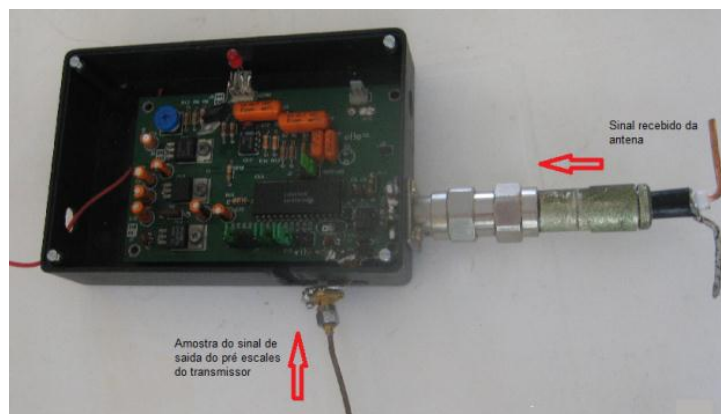
O oscilador utilizado é do tipo VCO controlado por um sistema PLL referenciado em um oscilador à cristal de 4 MHz, o qual apresenta boa estabilidade de frequência, com amplitude de 7,5 dBm em uma impedância de  $50 \Omega$ .

## 5.5 Comparador detector de fase e frequência

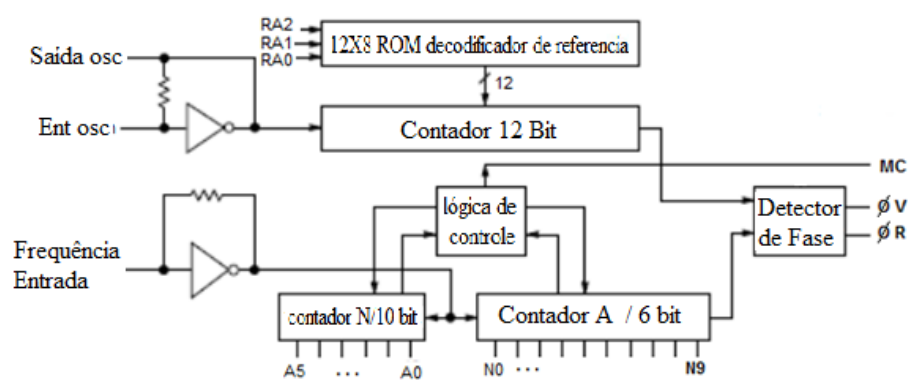
Para detectar a diferença de fase e frequência entre o sinal gerado e o sinal recebido é proposta a utilização de um circuito integrado sintetizador, o qual compara o sinal refletido com uma amostra do sinal gerado. Para isso é necessário baixar a frequência da faixa de 2,5 GHz para a faixa abaixo de 20 MHz utilizando um pré-escaler 2 externo que fornecerá uma faixa de frequência ao comparador (Figura 5.12).

O sinal recebido pela antena é injetado na entrada  $f_{in}$  do pré-escaler 2 de recepção. Esta entrada abaixa a frequência novamente conforme a programação do divisor; o sinal da transmissão é retirado por uma amostra na saída do pré escaler 1 de transmissão e injetado na entrada de oscilador externo, que passa por um segundo divisor. Para que estes sinais sejam corretamente trabalhados as duas divisões, deve-se manter o mesmo valor de frequência após a divisão (Figura 5.13).





**Figura 5.12** – Foto do circuito comparador detector de fase e frequência



**Figura 5.13** – Diagrama de blocos do sintetizador utilizado

**Fonte:** Datasheet Motorola

## 5.6 Teste de reflexão da portadora sem modulação

Foram utilizadas duas parábolas de 14 cm de diâmetro sendo a de transmissão excitada pelo modulo oscilador de portadora no qual foi gerado um sinal senoidal com frequência de 2550 MHz com 7,5 dBm. Os objetivos destes testes foram: a identificação de possível realimentação de sinal devido à proximidade do oscilador de transmissão com as antenas e a identificação do sinal refletido por um obstáculo

### 5.6.1 No espaço livre com reflexão no concreto

Para o teste foi utilizado uma parede de blocos de concreto como meio de reflexão. A antena receptora instalada a distância de 9 metros da parede e a 1 metro do solo, a antena de transmissão e recepção foram posicionadas de tal forma a isolar uma

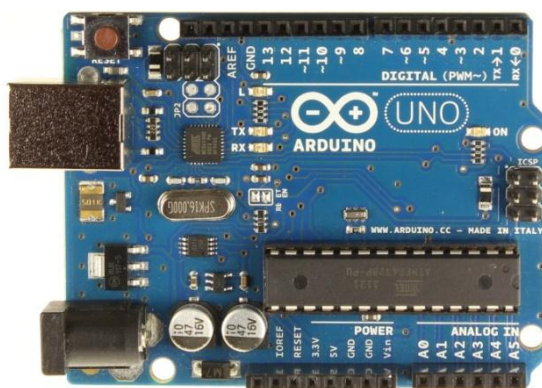
antena da outra. Para isso o sistema foi montado em uma estrutura metálica com chapas de zinco proporcionando maior isolamento (Figura 5.14).



**Figura 5.14** – Foto das antenas de transmissão e recepção

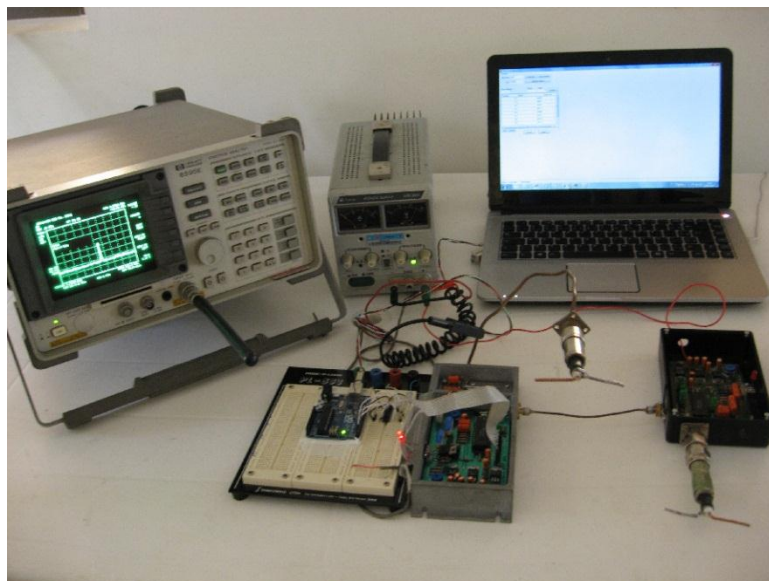
### 5.7 Módulo gerador do sinal modulante

Para geração do sinal modulante foi utilizada a placa ARDUINO UNO® (Figura 5.15), composta por um controlador, algumas linhas de entradas e saídas digitais e analógicas, além de uma interface serial ou USB, para conexão com computador, utilizado para programar e interagir em tempo real com o módulo (Figura 5.16); O software foi carregado com uma tabela de palavras binárias (Figura 5.17) as quais definem ao valor do divisor de frequência que irá gerar a modulação em frequência do transmissor.



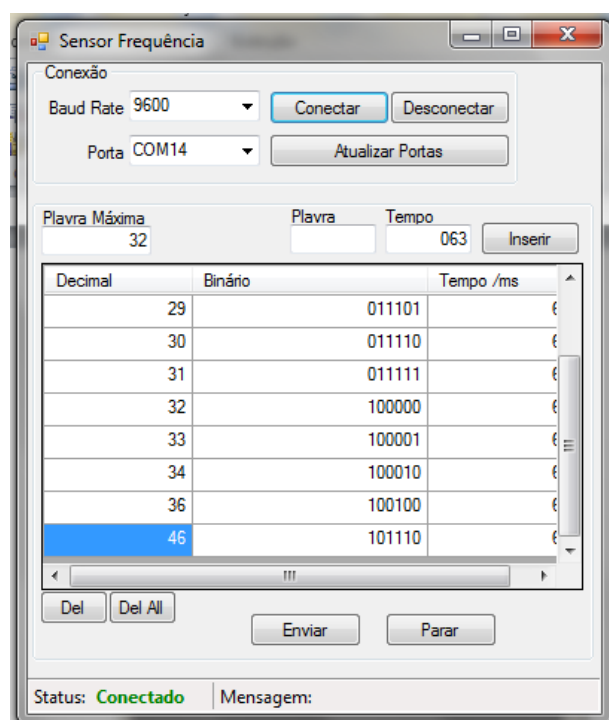
**Figura 5.15** - Placa de desenvolvimento ARDUINO UNO

**Fonte:** Datasheet ARDUINO



**Figura 5.16** - Foto dos testes de modulação no laboratório

Com este software é possível definir o valor da divisão e o tempo em que a frequência será mantida (Figura 5.17).



**Figura 5.17** – Tela do software de geração do ARDUINO UNO

### 5.8 Cálculo da distância entre o sensor e superfície medida

A distância  $R$  em metros, entre o sensor e o nível do material, pode ser calculada considerando a frequência ( $f_d$ ) em hertz que é a diferença entre a frequência que está sendo gerada no momento e a frequência recebida ( $F_R$ ) no mesmo momento (Tabela 5.2)(Figura 5.18), o tempo ( $T_m$ ) em segundos utilizado na repetição da sequência do sinal modulado e a BW faixa de frequência gerada pelo espectro modulado ( $\Delta_{Fdev}$ ) hertz (Figura 3.14).

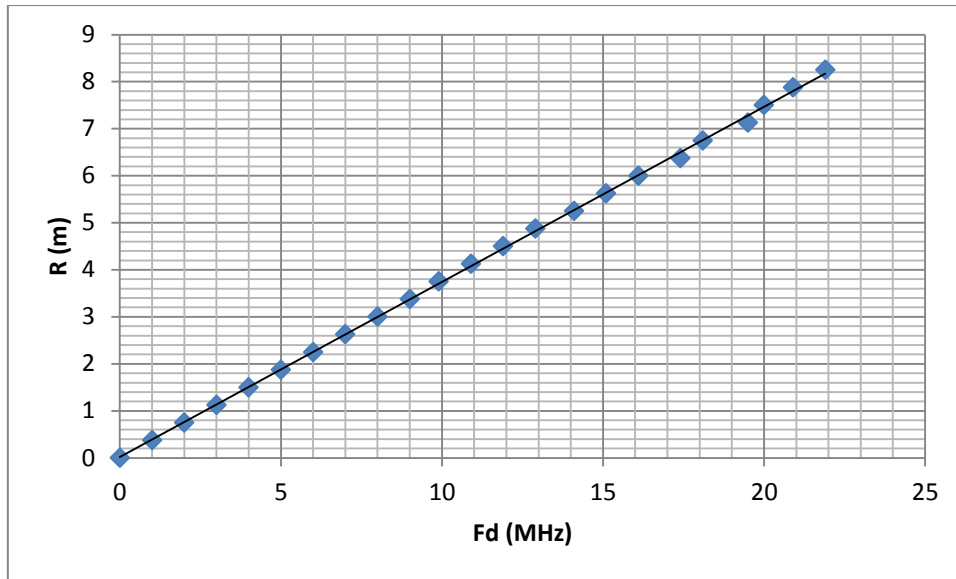
$$R = \frac{T_m c f_d}{2 \Delta_{Fdev}} \quad (5.6)$$

Através do software utilizado no controle do ARDUINO é possível variar  $T_m$  e  $\Delta_{Fdev}$  controlando o range e a precisão da medida do nível medido. Quanto maior for a diferença entre a frequência de transmissão e a frequência de recepção mais vazio estará o tanque.

O período ( $T_m$ ) está relacionado à quantidade de palavras binárias a serem geradas, a frequência de varredura apresentada no software do ARDUINO. A quantidade de palavras a ser programada irá depender do tempo de resposta máximo permitido pelo circuito integrado, neste caso o MC145151-2 da Motorola utilizado no controle do VCO principal.

**Tabela 5.2** – Cálculo de níveis em relação à  $f_0$ 

| <b>Frequência momentânea</b> | <b><math>F_R</math> (MHz)</b> | <b>Diferenças entre as frequências <math>f_d</math> (Hz)</b> | <b>Nível (m)<br/>Distância R</b> |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| $f_0$                        | 2566,8                        | -                                                            | 0                                |
| $f_1$                        | 2565,8                        | 1,00E+06                                                     | 0,375                            |
| $f_2$                        | 2564,8                        | 2,00E+06                                                     | 0,750                            |
| $f_3$                        | 2563,8                        | 3,00E+06                                                     | 1,125                            |
| $f_4$                        | 2562,8                        | 4,00E+06                                                     | 1,500                            |
| $f_5$                        | 2561,8                        | 5,00E+06                                                     | 1,875                            |
| $f_6$                        | 2560,8                        | 6,00E+06                                                     | 2,250                            |
| $f_7$                        | 2559,8                        | 7,00E+06                                                     | 2,625                            |
| $f_8$                        | 2558,8                        | 8,00E+06                                                     | 3,000                            |
| $f_9$                        | 2557,8                        | 9,00E+06                                                     | 3,375                            |
| $f_{10}$                     | 2556,9                        | 1,00E+07                                                     | 3,750                            |
| $f_{11}$                     | 2555,9                        | 1,10E+07                                                     | 4,125                            |
| $f_{12}$                     | 2554,9                        | 1,20E+07                                                     | 4,500                            |
| $f_{13}$                     | 2553,9                        | 1,30E+07                                                     | 4,875                            |
| $f_{14}$                     | 2552,7                        | 1,40E+07                                                     | 5,250                            |
| $f_{15}$                     | 2551,7                        | 1,50E+07                                                     | 5,625                            |
| $f_{16}$                     | 2550,7                        | 1,60E+07                                                     | 6,000                            |
| $f_{17}$                     | 2549,4                        | 1,70E+07                                                     | 6,375                            |
| $f_{18}$                     | 2548,7                        | 1,80E+07                                                     | 6,750                            |
| $f_{19}$                     | 2547,3                        | 1,90E+07                                                     | 7,125                            |
| $f_{20}$                     | 2546,8                        | 2,00E+07                                                     | 7,500                            |
| $f_{21}$                     | 2545,9                        | 2,10E+07                                                     | 7,875                            |
| $f_{22}$                     | 2544,9                        | 2,20E+07                                                     | 8,250                            |



**Figura 5.18** – Gráfico de medida de nível em relação à diferença das frequências de transmissão e recepção

### 5.9 Cálculo do nível de sinal incidente no meio de reflexão

Cálculo da potência do sinal incidente na superfície ( $p'$ ) a ser medida, o nível de enchimento em relação à superfície do material e o sensor considerando o meio de propagação o ar, livre de características que venham alterar a velocidade de propagação, pode ser realizado pela equação 2.2. Para isso considera-se a frequência de operação de 2550 MHz, o ganho real da antena de transmissão igual a 14,5 dBd, o nível de saída no filtro de 7,5 dBm equivalente a 5,62 vezes e a distância máxima de 8,25 metros para o tanque vazio.

$$p' = \frac{GP_t}{4\pi R^2} \quad (5.7)$$

$$p' = \frac{14,5 \cdot 5,62}{4\pi \cdot 8,25^2} = 95,3 \cdot 10^{-3} \text{ dBm}$$

### 5.10 Cálculo do diâmetro da área de projeção do sinal na superfície

Cálculo do diâmetro da área de projeção  $D_a$  do sinal sobre a superfície a ser medida o nível, aplicando a equação 5.4, em relação à antena de transmissão com diâmetro  $d$  relativo a 25,73 cm, a distância  $R$  de 8,25 metros entre o sensor e o tanque com nível vazio a um ângulo de abertura  $\phi$  de 32° medidos em teste

$$D_a = d + 2 R \tan(\phi) \quad (5.8)$$

$$D_a = 0,2573 + 2 \cdot 8,25 \tan(32)$$

$$D_a = 10,57 \text{ m}$$

Para as demais frequências obtiveram-se os valores da tabela 5.3.

**Tabela 5.3** – Cálculo do diâmetro da área de projeção na superfície

| Nível (m) | Diâmetro de abertura<br>antena TX (m) |       |
|-----------|---------------------------------------|-------|
| 0,000     | 0,14                                  | Cheio |
| 0,375     | 0,61                                  |       |
| 0,750     | 1,08                                  |       |
| 1,125     | 1,55                                  |       |
| 1,500     | 2,02                                  |       |
| 1,875     | 2,48                                  |       |
| 2,250     | 2,95                                  |       |
| 2,625     | 3,42                                  |       |
| 3,000     | 3,89                                  |       |
| 3,375     | 4,36                                  |       |
| 3,713     | 4,78                                  |       |
| 4,088     | 5,25                                  |       |
| 4,463     | 5,72                                  |       |
| 4,838     | 6,19                                  |       |
| 5,288     | 6,75                                  |       |
| 5,663     | 7,22                                  |       |
| 6,038     | 7,69                                  |       |
| 6,525     | 8,30                                  |       |
| 6,788     | 8,62                                  |       |
| 7,313     | 9,28                                  | Vazio |
| 7,500     | 9,52                                  |       |
| 7,838     | 9,94                                  |       |
| 8,213     | 10,41                                 |       |

### 5.11 Cálculo do nível de recepção do sinal entregue ao amplificador de entrada

$$S = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \cdot \frac{\varphi}{4\pi R^2} \cdot \frac{G \lambda^2}{4\pi} = \frac{P_t G^2 \varphi \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (5.9)$$

$$S = \frac{7,5 \cdot 28,18 \cdot 10 \cdot 84,95 \cdot 0,1176^2}{(4\pi)^3 \cdot 8,2^4}$$

$$S = 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ dBm}$$

Considerando uma área de reflexão de  $84,95 \text{ m}^2$  com diâmetro de  $10,41 \text{ m}$  e uma superfície com perdas desprezíveis, obtemos um sinal na entrada do amplificador de recepção (S) de  **$0,27 \cdot 10^{-3} \text{ dBm}$  sobre uma impedância de  $50\Omega$** .



## CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresenta detalhes quanto ao funcionamento de um sensor de nível radar FMCW de micro-ondas, bem como algumas dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do protótipo. Houve a necessidade de confeccionar de forma artesanal alguns componentes, não permitindo a obtenção de resultados com o desempenho esperado. No entanto, com base na pesquisa bibliográfica foi possível comprovar na prática o funcionamento do sistema irradiante, do modulador e do software de controle de modulação utilizados no protótipo.

Os testes foram realizados a partir da utilização de um software para o controle da placa de desenvolvimento ARDUINO, o qual proporcionou a flexibilidade na geração das palavras binárias, permitindo a alteração do tempo de cada frequência modulada, bem como o valor das frequências. O conversor comparador e o sintetizador utilizado, permitiram a geração das variações de tensão necessárias para controle do VCO, gerando o espectro de frequências desejadas na faixa de 2,5 GHz. Acoplou-se um amplificador sintonizado para compensar as perdas causadas por um filtro passa faixa com uma banda de 22MHz necessário para eliminar frequências espúrias, obtendo-se na saída do filtro um sinal modulado com nível de 7,5 dBm.

Optou-se por utilizar antenas parabólicas de 14 cm de diâmetro alimentadas por dipolos de meia onda, no entanto o ângulo de abertura foi considerado muito grande o que inviabilizaria o uso prático para níveis acima de 10 metros. Para confecção das antenas parabólicas foram apresentados os cálculos teóricos do ganho cujo resultado foi de 9,5 dB e uma largura de feixe em relação ao ponto de meia potência de 58,8°. Foram realizadas medidas utilizando o sistema de transmissão com uma das antenas e um analisador de espectro para a recepção, a fim de se coletar valores para se traçar o diagrama de irradiação das antenas, utilizando o software FadaWin, no qual a antena de recepção apresentou uma largura de feixe de 56° e a antena de transmissão uma abertura de feixe de 32° devido ao RADOME acrescentado para melhorar o isolamento entre as antenas.

No entanto comprovou-se que, para baixa frequência e antenas de pequenos diâmetros, necessitaria tanques de grandes áreas que pudessem receber o diâmetro do sinal projetado sobre a superfície sem a influência das paredes.

São apresentados abaixo alguns itens que fazem parte da proposta deste protótipo que não foram implementados por razões diversas.

- O software de correção para conformação da leitura e compensação das variações do meio não chegou a ser implementado. É por meio deste que se realiza as correções e compensações ligadas ao produto medido e ao meio de propagação que, em uma aplicação industrial em condições reais é de fundamental importância na parametrização do sensor.
- O sistema para cancelamento de sinais espúrios composto de processamento e software dedicado, cuja complexidade apresentada foge o escopo deste trabalho. Entretanto, este é de vital importância no funcionamento do sensor; item considerado sigiloso pelas empresas que produzem este tipo de equipamento. O cancelamento da realimentação do sinal transmitido sobre a recepção é um dos fatores trabalhados por este processamento sem o qual se inviabiliza a utilização de antena única.

Algumas limitações apareceram durante o desenvolvimento do protótipo as quais são apresentadas abaixo:

Durante os testes ocorreu a queima do oscilador e devido ao alto custo dos componentes não foi possível a reposição do mesmo;

Não existem fabricantes nacionais e os fabricantes que produzem os sensores FMCW não disponibilizam informações técnicas sobre o dispositivo.

Alguns fabricantes restringem as informações sobre o funcionamento básico, diagramas em blocos e manuais que apresentam características mínimas como: faixa de frequência de operação, tipo de aplicação, faixa de medição, tipo de antena, temperatura de processo e pressão do processo.

Os componentes para frequências acima de 24 GHz utilizados em sensores industriais são produzidos sobre demanda e a burocracia para a aquisição destes componentes é grande, pois os mesmos são utilizados para fins militares e aeroespaciais.

Os testes e ensaios utilizando micro-ondas foram realizados utilizando equipamentos e laboratórios de empresas, o que reduziu muito o tempo de testes e desenvolvimento.

Os testes de laboratório demandam equipamentos como geradores de sinal, analisadores de espectro, antenas, componentes como mixer e circuladores de micro-ondas.

As sugestões para trabalhos futuros são decorrentes das deficiências encontradas no desenvolvimento do protótipo.

- Desenvolvimento de software para o processamento de sinal para eliminar sinais indesejados e recuperação do sinal principal;
- Desenvolvimento de software para tratamento dos dados de leitura do sinal disponibilizado na saída do sintetizador 2, com possibilidades de entrada de parâmetros para correção e compensação das características ligadas ao material a ser detectado o nível e ao ambiente, tais como variações de pressão, temperatura e partículas suspensas, compatibilizando os valores para serem trabalhados em redes industriais, protocolos de comunicação e equipamentos de automação;
- Testes de desempenho com outros tipos de sinais modulantes, e
- Testes com outros tipos de antenas e arranjos de antenas.

De uma maneira geral, o desenvolvimento deste protótipo contribuiu para a compreensão do funcionamento do sensor de nível radar FMCW por micro-ondas, apresentando algumas alternativas tais como utilização da modulação por níveis discretos para o controle das características do FMCW.

As experiências realizadas e os dados fornecidos são de fundamental importância para novos trabalhos como a geração de novas fontes de consultas técnicas, um software que atenda de maneira abrangente a demanda de diversos ambientes e produtos.

A aplicação deste tipo de sensor tem aumentado com o avanço tecnológico. Novos dispositivos que utilizam a tecnologia radar FMCW em micro-ondas começam a ser aplicados em outros seguimentos e é de fundamental importância para nossa indústria o conhecimento e o domínio desta tecnologia, hoje dominada por empresas estrangeiras.

Existem poucas publicações relacionadas a este dispositivo, assim a geração de novas fontes de consultas técnicas tem grande relevância. O domínio de poucos

fabricantes internacionais encarecem este tipo de sensor o que vem limitar o uso a somente em grandes indústrias.

Devido ao custo elevado, este tipo de sensor é aplicado em segmentos muito específicos, onde outros tipos de sensores não atendam com a precisão necessária a demanda dos processos.

Algumas pesquisas atualmente realizadas com FMCW em 94 GHz, são difíceis de serem reproduzidas por demandarem instrumentos de altíssimo custo e uso restrito.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAEK, Tae-Jong, Dong-Sik Ko, Sang-Jin Lee, Yong-Hyun Baek, Min Han, Seok-Gyu Choi, Jae-Hyun Choi, Wan-Joo Kim, and Jin-Koo Rhee, *Fellow, A Transceiver Module for FMCW Radars Sensors Using 94-GHz Dot-Type Schottky Diode Mixer*, *IEEE Sensors Journal*, Vol 11 N° 2 February, 2011.

BAGATO, Vanderlei S. **Os Fundamentos da Luz Laser Física na Escola**, v. 2, n. 2, 2001.

BARRADAS, O & SILVA, A. F. **Telecomunicações: Sistemas de Radiovisibilidade**. Ed. Livros Técnicos e científicos, Embratel, 1978.

BASTOS Izabella Carneiro, **Proposta para melhoria da resolução em Radares FMCW utilizados na medição de nível**; Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, 2010.

BEGA Egidio Alberto (organizador), **Instrumentação Industrial** , Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2003.

BERKOWITZ Raymond S., **Modern RADAR , Analysis, Evaluation, and System Design**, John Wiley & Sons, Inc, USA, 1966.

BRUMBI Detlef, Messtechnik Krohne, Ludwing Krohne, **Measuring Process and Storage Tank Level with Radar Technology**, 1995

CASTILLO Sergio Ramírez; **Estudio de las nterferências um detección de blancos para um sistema lidar FMCW**; PFC; Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Barcelona, 2009.

CONTI Dante, **Software FADAIN**, disponibilizado por Trans-tel, [WWW.transtelconti.com.br](http://WWW.transtelconti.com.br), acesso em: 06/11/2010.

CONTI Dante, **Utilização das Antenas de transmissão**, Publicado por Trans-tel, Campinas, 2009.

Control Engineering Magazine, 2002 Acessado em 20/08/2010  
<http://www.controleng.com>.

DATA SHEET MOTOROLA **MC145151-2**, Phoenix, Arizona;1995.

DEVINE, Peter, **Radar Level Measurement – The user's guide**, Publicado por Vega Controls Ltda, 2000;144 pp.

DORF, C. Richard, **Electronics, Power Electronics, Optoelectronics, Microwaves, Electromagnetics, and Radar, The Electrical Engineering Handbook**, Third Edition, University of California.

FIALHO, Arivelto Bustamante, **Instrumentação Industrial** ,4ªedição, Erica, São Paulo, 2002.

GOMES, Alcides Tadeu, **Telecomunicações: transmissão e recepção AM/FM-Sistemas Pulsados** , 9ª Edição, Érica, São Paulo, 1985.

GROOVER Mikell P. **Automação Industrial e sistemas de manufatura**,3 ed, Pearson Prentice Hall; São Paulo; 2011; 581pp.

GUIMARÃES A. P. **Ciência Hoje** , vol. 28, 2000.

JENN ,David ,**Microwave Devices & Radar**, Naval Postgraduate School, USA, 2003.

KUROKI, Koichi Yamaoka, and Yu-suke Murata ;Tsukasa Yoneyama, **NRD Guide Pulse Radar Front-End for Level Sensor Applications at 60 GHz**, 2009.

KRAUS, J. D. **Electromagnetics**. 4<sup>th</sup>. Ed. New York: McGraw-Hill, USA,1992.

LEWIS Joe, **Application Considerations for Continuous Level and Inventory Monitoring of Powder and Bulk Solids**, White paper 004, BlueLevel Technologies, Inc, 2010.

LIMA Hugo Santana, **Propagação em Sistemas de Radio Enlace**, Universidade Santa Cecília,  
[http://professores.unisanta.br/santana/downloads/Telecom/Sistemas\\_Telecom/Radio/Propagatpo\\_Radio.pdf](http://professores.unisanta.br/santana/downloads/Telecom/Sistemas_Telecom/Radio/Propagatpo_Radio.pdf), acesso em 17/12/2011.

LIPTAK B.G., **Instrument Engineers' Handbook**, Volume 2: Process Measurement and Analysis, CRC, 2003.

MARTINES Marco Antonio Utrera, Marian Rosaly Davolos e Miguel Jafelicci Júnior **O Efeito Do Ultrassom Em Reações Químicas; Química Nova**, 23(2) Instituto de Química – Universidade Estadual Paulista – UNESP Araraquara – SP, 2000.

MIGUENS Altineu Pires **Navegação Eletrônica em condições especiais** Vol III 1996  
[http://www.mar.mil.br/dhn/bhmn/publica\\_manualnav3.html](http://www.mar.mil.br/dhn/bhmn/publica_manualnav3.html), acesso em: 08/06/2009.

MOTTA Ricardo Sebastião Nadur e Moacir Alves dos Reis **Sondas RADAR De Medição Do Nível Da Carga Do Alto-Forno 3 Da CSN**, isarj,2011

NYFORS Ebbe, **Industrial Microwave Sensors, Subsurface Sensing Technologies and Applications**, Vol 1, N°1 , 2000.

PANARO José Santo G, **TP504\_PLL\_Panaro.pdf** [www.inatel.br](http://www.inatel.br), acesso em 30/06/2009.

POURVOYEUR K.,R. Feger,S. Schuster,A. Stelzer, L. Maurer, **Ramp Sequence Analysis to Resolve Multi Target Scenarios for a 77- GHz FMCW Radar Sensor**, IEEE, 2009.

REITZ, J. R., MILFORD, F. J., CHRISTY W. R., **Fundations of Eletromagnetic**

**Theory, Addison** – Wesley Publishing Inc, 1980.

RIBEIRO, J. A. Justino. **Propagação das Ondas Eletromagnéticas**, Editora Érica, São Paulo, 2004.

RIBEIRO, Marco Antônio, **Instrumentação**, <http://pt.scribd.com/doc/48758745/Instrumentacao-13a-Marco-Antonio-Ribeiro#download>, acesso em 06/07/2012.

RIBEIRO, J. A. Justino., **Engenharia de Microondas – Fundamentos e Aplicações**,: Editora Érica, São Paulo, 2008.

SACK Holger **Level measurement with radar – a success story** ; MSTR Magazin vol 6, 2005.

SOUZA, Z., BORTONI, C. Edson., **Instrumentação para Sistemas Energéticos e Industriais**, Gráfica e Editora Novo Mundo Ltda, 2006.387pp

THOMAZINI, Daniel, ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga de , **Sensores Industriais Fundamentos e Aplicações**, 3º edição, Editora Érica, São Paulo, 2007.

TORT, Alexandre C. , CUNHA, Alexander M.; ASSIS,A.K.T **Uma tradução comentada de um texto de Maxwell sobre ação e distância**, Revista Brasileira de Ensino de Física, [http://www.ifi.unicamp.br/~assis/Revista-Bras-Ens-Fis-V26-p273-282\(2004\).pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~assis/Revista-Bras-Ens-Fis-V26-p273-282(2004).pdf) acesso em : 09/10/2011.

ULABY, F. T., **Eletromagnetismo para Engenheiros**, Editora Artmed , Bookman 2007.

**Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de Metrologia** ;5. ed. -- Rio de Janeiro: Ed. SENAI, 2007; 47pp

WALDSCHMIDT, Dayson Roberto, **Desenvolvimento de um Medidor de Fração de Água Utilizando Tecnologia de Micro-ondas**, Dissertação de mestrado UFSC, 2008.



WASER Andre **On the Notation of Maxwell's Field Equations**, AW-Verlag, 2000.

ZHANG, Yan *RF/Microwave system analysis For wideband radar/ remote sensing*,  
University of Nebraska, Lincoln, 2003.