

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
INFORMÁTICA INDUSTRIAL - CPGEI

JOÃO MARCOS FERREIRA DAMACENO

**SISTEMA PARA AVALIAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DO SOLO  
UTILIZANDO A ANÁLISE DE IMPEDÂNCIA E TÉCNICAS DE  
ULTRASSOM**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2010

JOÃO MARCOS FERREIRA DAMACENO

**SISTEMA PARA AVALIAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DO SOLO  
UTILIZANDO A ANÁLISE DE IMPEDÂNCIA E TÉCNICAS DE  
ULTRASSOM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências – Área de Concentração: Engenharia Biomédica.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia.

CURITIBA

2010

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

- D154 Damaceno, João Marcos Ferreira  
Sistema para avaliação da umidade relativa do solo utilizando a análise de impedância e técnicas de ultrassom / João Marcos Ferreira Damaceno. — 2010.  
97 f. : il. ; 30 cm
- Orientador: Joaquim Miguel Maia.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2010.  
Bibliografia: f. 79-86.
1. Solos – Umidade – Medição. 2. Solos – Análise. 3. Ultrassom. 4. Impedânciometria. 5. Simulação (Computadores). 6. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Maia, Joaquim Miguel, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

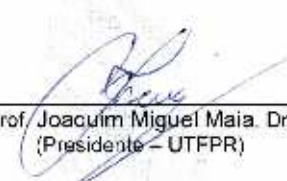
Título da Dissertação Nº 529:

**“Sistema para avaliação da umidade relativa do solo utilizando a análise de impedância e técnicas de ultrassom”**

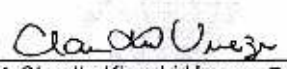
por

**João Marcos Ferreira Damaceno**

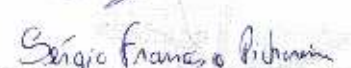
Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia Biomédica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba às 14h do dia 21 de maio de 2010. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:



Prof. Joaquim Miguel Maia, Dr.  
(Presidente – UTFPR)




Prof. Claudio Kiyoshi Umezú, Dr.  
(UNICAMP)



Prof. Sérgio Francisco Pichorim, Dr.  
(UTFPR)

Visto da coordenação:



Prof. Fábio Kurt Schneider, Dr.  
(Coordenador do CPGEI)

Dedico esse trabalho à minha família pelo incentivo dado.

Aos companheiros de laboratório pelo auxílio e troca de experiência.

Ao meu orientador pela disposição em ensinar e por sua paciência demonstrada no decorrer do trabalho.

Aos meus primos, amigos e namorada, pela compreensão de minha ausência.

Em especial dedico à minha mãe por todo apoio e carinho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus que esteve sempre presente dando força para continuar em mais essa jornada.

Ao professor Dr. Joaquim Miguel Maia pela oportunidade e confiança em mim depositado, pela sua compreensão, dedicação, conhecimento, companheirismo e orientação dada.

À professora Sonia Zanello pela sua ajuda e esclarecimentos em questões relacionadas a solos.

Aos colegas de laboratório pelo companheirismo, convívio, estímulo e partilha, em especial, Carmem Raserá, Luciana, Santo Tiveroli, Marcos Garcia, Henrique, Jun, Samuel Marcondes, Luis Kalva de Andrade, Amauri Assef, Renan Armstrong e Cristiana aos quais atribuo muitos momentos inesquecíveis.

Aos professores do CPGEI pelo conhecimento compartilhado.

À UTFPR pelo apoio e préstimo.

À empresa Murata e Texas Instruments, pelas amostras cedidas.

À equipe de desenvolvimento e montagem da empresa Ponto System, que sempre supriu a minha ausência e em especial ao Roberto Colchão e Ricardo Moreno, pelo apoio e prontidão em atender meus pedidos.

Ao amigo Ricardo Bernardi pelo apoio e ajuda dada nos momentos mais difíceis.

Aos meus primos e amigos de torcida, por sempre me deixarem atualizados mesmo nos momentos de ausência, ao qual, assim como já feito em ocasiões passadas dedico o último ano de mestrado a eles.

A minha família e namorada pela compreensão, carinho, ajuda e incentivo em mais essa jornada.

## RESUMO

DAMACENO, João M. F. **Sistema para avaliação da umidade relativa do solo utilizando a análise da impedância e técnicas de ultrassom.** 2010. 97 f.. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná). Curitiba, 2010.

Visando a melhoria dos processos agrícolas para produção sustentável de alimentos, o conhecimento do teor de umidade relativa vem a cooperar no processo de irrigação, apontada como uma grande consumidora de água, além de auxiliar em estudos hidrológicos, meteorológicos, geotécnicos, dentre outros. Este trabalho apresenta o desenvolvimento do *hardware* e *firmware* de um protótipo para ser utilizado com técnicas de ultrassom e análise de impedância, visando o desenvolvimento de futuros produtos para avaliar o teor de água no solo. Para a análise da impedância foi utilizado um sensor de placas paralelas, separadas 24 mm uma da outra, utilizadas juntamente com o *hardware* e *firmware* desenvolvido, para detectar a variação da constante dielétrica do solo com acréscimo de água, através da variação da fase dos sinais de tensão e corrente ao passar pelo sensor inserido no meio. Obteve-se, ao analisar 15 amostras, uma relação logarítmica crescente da variação de fase em função do acréscimo de água no solo. No estudo da caracterização da umidade do solo através do ultrassom, obteve-se resultados preliminares expressivos para as mudanças da amplitude dos sinais ultrassônicos de 40 kHz e 100 kHz no modo transmissão/recepção ao propagar-se no solo com diferentes níveis de umidade.

**Palavras-chave:** Umidade relativa, Solo, Ultrassom, impedanciometria.

## ABSTRACT

DAMACENO, João M. F.. **System for evaluation of soil water content using analysis of impedance and ultrasound techniques**. 2010. 97 f. Dissertation (Post-Graduate Program in Electrical Engineering and Computer Science Industrial of the Federal Technological University of Parana). Curitiba, 2009

To improve agricultural processes for sustainable food production, knowledge of the moisture is useful to cooperate in the irrigation process, identified as a major consumer of water, besides helping in hydrological studies, meteorological, geotechnical, among others. This paper presents the development of the hardware and firmware of a prototype to be used with ultrasound techniques and impedance analysis for the development of future products to evaluate the water content in soil. For the impedance analysis, it was used a parallel plate sensor, with the plates separated from 24 mm each other, used together with the hardware and firmware developed to detect the variation of dielectric constant with the increase of soil water, by varying the phase of voltage and current signals in the sensor inserted in the medium. The results obtained, when analyzing 15 samples, presented a ratio of logarithmic growing of the phase variation due to increased soil water. In the study of characterization of soil moisture using a transmission/reception ultrasound system, the preliminary results have shown significant changes in the amplitude of ultrasonic waves of 40 kHz and 100 kHz propagating through the soil at different moisture levels.

**Keywords:** Soil water content, Ultrasonic, Capacitance, Analysis of impedance.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – APRESENTAÇÃO DO COMPLEXO TRIFÁSICO.EM (A) APRESENTA-SE A COMPOSIÇÃO BÁSICA DO SOLO COM O SISTEMA TRIFÁSICO: SÓLIDO, LÍQUIDO E GASOSO; (B) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS FASES DO SOLO.....	20
Figura 2.2 – ESTRUTURA DE LIGAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO, CONTENDO LIGAÇÕES FORTEMENTE E FRACAMENTE LIGADAS POR ADSORÇÃO E A ÁGUA VISCOSA. ....	22
Figura 2.3 - PERDA DIELÉTRICA DE UMA AMOSTRA ESPECÍFICA DE SOLO SOB PASTAGEM COM DENSIDADE DE 1,12 G*CM-3 E FRAÇÃO ORGÂNICA < 5%, AVALIADA EM TRÊS NÍVEIS DE UMIDADE: A, W = 65 %; B, W = 55 %; C, W = 7,4 %. ....	28
Figura 2.4 – PERDAS DIELÉTRICAS E EM FUNÇÃO DA UMIDADE W (%), NA FREQUÊNCIA DE 35 MHZ PARA DIFERENTES TIPOS DE SOLO. A, NO SOLO DE PASTAGEM; B, HORIZONTE A <sub>H</sub> DE TERRA MARROM; C, HÚMUS; D, SOLO ARENOSO.....	29
Figura 2.5 – CIRCUITO RC. ....	30
Figura 2.6 – EM (A) APRESENTA O SINAL DA TENSÃO V E CORRENTE I APLICADAS EM CARGAS RESISTIVAS; (B) APRESENTA O ADIANTAMENTO $\phi$ DA CORRENTE I EM RELAÇÃO À TENSÃO QUANDO APLICADAS EM CARGAS CAPACITIVAS.....	31
Figura 2.7 – DESCRIÇÃO INTERNA DE UM SENSOR ULTRASSÔNICO.....	32
Figura 2.8 – TRANSDUTOR ULTRASSÔNICO TRABALHANDO NO MODO PULSO-ECO. ....	34
Figura 2.9 – TRANSDUTOR ULTRASSÔNICO TRABALHANDO NO MODO TRANSMISSÃO-RECEPÇÃO.....	35
Figura 3.1 – DIAGRAMA EM BLOCOS DO HARDWARE PROJETADO.....	37
Figura 3.2 – PLACA LÓGICA OU DE CONTROLE.....	37
Figura 3.3 – ARQUITETURA DO MSP430. VISUALIZAÇÃO DO BARRAMENTO DA UNIDADE CENTRAL DE PROCESSAMENTO RISC, COM OS PERIFÉRICOS.....	38
Figura 3.4 – CIRCUITO DE INTERFACE SERIAL TIPO UART.....	39
Figura 3.5 – CIRCUITO SERIAL TIPO USB. UTILIZA-SE O CI TUSB3410 COMO INTERFACE ENTRE OS SINAIS TTL E A INTERFACE USB.....	40
Figura 3.6 – CIRCUITO DE AQUISIÇÃO ULTRASSÔNICO. O CI ADS5410 RESPONSÁVEL POR EFETUAR A DIGITALIZAÇÃO DO SINAL, COM A FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM DEFINIDA PELA SAÍDA DE CLOCK DO CI LTC6903/6904 E O SINAL FORNECIDO PELA SAÍDA DO DIFERENCIADOR THS4503.....	41
Figura 3.7 – CIRCUITO DE MEMÓRIA AUXILIAR: FIFO SN74V293. MEMÓRIA CONECTADA AOS PINOS DO MICROCONTROLADOR CI MSP430FG4618 PARA O ARMAZENAMENTO DOS SINAIS GERADOS PELO CONVERSOR A/D CI ADS5410, PARA PÓS-PROCESSAMENTO DO MICROCONTROLADOR.....	44

Figura 3.8 – CONECTORES DE EXPANSÃO DA PLACA DE AQUISIÇÃO – IMPEDANCIOMETRIA. CONEXÕES LÓGICAS E DE ALIMENTAÇÃO ENTRE AS PLACAS DE AQUISIÇÃO – IMPEDANCIOMETRIA E A PLACA LÓGICA OU DE CONTROLE. ....	45
Figura 3.9 – LACA DE AQUISIÇÃO – IMPEDANCIOMETRIA CONECTADA À PLACA AUXILIAR.....	46
Figura 3.10 – DIAGRAMA FUNCIONAL DO DDS AD9832.....	47
Figura 3.11 – CIRCUITO GERADOR SENOIDAL DDS AD9832, COM O SINAL DE REFERÊNCIA DE 24MHZ.....	48
Figura 3.12 – BUFFER E FILTRO PASSA-FAIXA. ESTÁGIO (A1):CIRCUITO ISOLADOR. ESTÁGIOS (A2) E (A3): FILTRO PASSA-FAIXA.....	49
Figura 3.13 – CIRCUITO DETECTOR DE TENSÃO.....	50
Figura 3.14 – CIRCUITO DETECTOR DE CORRENTE E CONEXÃO DO SENSOR DE IMPEDÂNCIA. ....	51
Figura 3.15 – CIRCUITO DETECTOR DE TEMPERATURA.....	52
Figura 3.16 – RELAÇÃO ENTRE O SINAL DE ENTRADA E SAÍDA DO DETECTOR DE PICO DE CORRENTE. ....	53
Figura 3.17 – CIRCUITO DETECTOR DO PICO DE TENSÃO EM CORRENTE. EM (A) ESTÁ APRESENTADO O CIRCUITO DETECTOR DO PICO DE TENSÃO (AMPLITUDE V) E EM (B) O CIRCUITO DA CORRENTE (AMPLITUDE I).....	54
Figura 3.18 – CIRCUITO DETECTOR DE FASE. CIRCUITO SENSÍVEL À AMPLITUDE DE PICO E À DEFASAGEM ENTRE A AMOSTRA V E AMOSTRA I (CI MPY634), CONECTADO AO AMPLIFICADOR OPERACIONAL DE GANHO 1,5 V / V.....	54
Figura 3.19 – CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO DO DETECTOR DE FASE CI MPY634.....	55
Figura 3.20 – CIRCUITO MULTIPLEXADOR. REALIZA A SELEÇÃO DAS AMOSTRAS A SEREM DIGITALIZADAS. ....	56
Figura 3.21 – CIRCUITO PRINCIPAL DE ALIMENTAÇÃO.....	57
Figura 3.22 – CIRCUITO DE CONTROLE DE ESCRITA DO <i>DISPLAY</i> E DO <i>BACKLIGHT</i> . ....	58
Figura 3.23 – FLUXOGRAMA DO <i>FIRMWARE</i> .....	60
Figura 3.24 – DISPOSIÇÃO DOS VALORES DAS AMOSTRAS NO <i>DISPLAY</i> . ....	61
Figura 3.25 – SENSOR DE PLACAS PARALELAS PARA ANÁLISE DA IMPEDÂNCIA. ....	63
Figura 3.26 – SENSORES ULTRASSÔNICOS NO MODO TRANSMISSÃO-RECEPÇÃO.....	64
Figura 3.27 – DIAGRAMA DO CIRCUITO DE EXCITAÇÃO E AQUISIÇÃO DO SINAL ULTRASSÔNICO.....	65
Figura 3.28 – ESBOÇO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA EM FUNÇÃO DA ADIÇÃO DE ÁGUA. VISUALIZA-SE CADA DISPOSITIVO UTILIZADO JUNTAMENTE COM SUAS INTERFACES DE CONEXÃO.....	67
Figura 4.1 – AQUISIÇÃO DO MÓDULO E FASE DA IMPEDÂNCIA PARA FREQUÊNCIAS ENTRE 40 HZ A 110 MHZ, EVIDENCIANDO A INFLUÊNCIA NA VARIAÇÃO DA FASE DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE PLACAS PARALELAS PARA FREQUÊNCIAS SUPERIORES A 25 MHZ.....	70

Figura 4.2 – FASE E FREQUÊNCIA, EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUA ADICIONADA. VARREDURA DE 40 HZ À 10 MHZ. ....	70
Figura 4.3 – VARIAÇÃO DA FASE EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUA (F = 1MHZ) .....	71
Figura 4.4 – MOSTRA1. RELAÇÃO DA VARIAÇÃO DA FASE PARA 1 G DE ÁGUA ADICIONADA. EM AZUL ENCONTRA-SE O SINAL DA CORRENTE, EM VERMELHO O SINAL DA TENSÃO E EM VERDE O SINAL DE SAÍDA DO CI MPY634 COM GANHO DE 1,5 V/V. ....	72
Figura 4.5–AMOSTRA1. RELAÇÃO DA VARIAÇÃO DA FASE PARA 70 G DE ÁGUA ADICIONADA. EM AZUL ENCONTRA-SE O SINAL DA CORRENTE, EM VERMELHO O SINAL DA TENSÃO E EM VERDE O SINAL DE SAÍDA DO CI MPY634 COM GANHO DE 1,5 V/V. ....	72
Figura 4.6 – VARIAÇÃO DA FASE EM FUNÇÃO DO ACRÉSCIMO DE ÁGUA, ANALISADA EM TEMPERATURA AMBIENTE, PARA AS AMOSTRAS DE 1 À 10. ....	73
Figura 4.7 – RESULTADOS OBTIDOS, ATRAVÉS DO SISTEMA IMPLEMENTADO, UTILIZANDO-SE INTERPOLAÇÃO DOS PONTOS MÉDIOS (VERDE), FUNÇÃO EXPONENCIAL (VERMELHO) E FUNÇÃO POLINOMIAL (AZUL), PARA CARACTERIZAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO DA FASE ( $V * \cos\phi$ ) EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUA ADICIONADA, NA ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE 1 À 10. ....	74
Figura 4.9 – VARIAÇÃO DA FASE EM FUNÇÃO DO ACRÉSCIMO DE ÁGUA PARA TEMPOS DE ESPERA AUMENTADOS PARA QUANTIDADE DE ÁGUA ACRESCENTADA SUPERIOR À 20 G (AMOSTRAS 11 À 15), ASSIM COMO O AUMENTO DA TEMPERATURA EM 10 °C (AMOSTRA 13) E COM ACRÉSCIMO DE 24% DE CALCÁRIO DOLOMÍTICO TIPO D (AMOSTRA 15). ....	75
Figura 4.10 – SINAL ULTRASSÔNICO AO ATRAVESSAR 17 MM DE AR. ....	76
Figura 4.11 – FFT DO SINAL ULTRASSÔNICO AO ATRAVESSAR 17 MM DE AR. ....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - PERMISSIVIDADE RELATIVA DE ALGUNS CONSTITUINTES DO SOLO.....	26
Tabela 2.2 - PROPRIEDADES ACÚSTICAS DE VÁRIOS MEIOS.....	34
Tabela 4.1 - ATENUAÇÃO DA ONDA ULTRASSÔNICA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA UMIDADE AO ATRAVESSAR 4 MM DE SOLO.....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

CI	Circuito integrado
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
D/A	Digital / analógico
DDS	<i>Direct Digital Synthesis</i>
EF/OR	<i>Empty Flag/Output Ready</i>
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FDR	<i>Frequency Domain Reflectometry</i>
FET	<i>Field Effect Transistor</i>
FF/IR	<i>Full Flag/Input Ready</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FIFO	<i>First In-First Out</i>
FSEL0	<i>Flag-select bit 0</i>
FSEL1	<i>Flag-select bit 1</i>
FWFT	<i>First-word fall-through</i>
HF	<i>flag half-full</i>
I/O	<i>In / out</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IHO	Intervalo hídrico ótimo
IW	<i>Input width</i>
JTAG	<i>Joint Test Action Group</i>
LCD	<i>Liquid crystal display</i>
LD	<i>Load</i>
MAB	<i>Memory address bus</i>
MDB	<i>memory data bus</i>
MRS	<i>Master reset memory</i>
OE	<i>Output enable</i>
OIEA	Organismo Internacional de Energia Atômica
OMM	Organização Meteorológica Mundial
OW	<i>Output width</i>
PAE	<i>Almost-Empty</i>
PAF	<i>Almost-Full</i>

PRM	<i>Partial reset memory</i>
RCLK	<i>Read clock</i>
REN	<i>Read enable</i>
RISC	<i>Reduced Instruction Set</i>
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i>
UART	<i>Universal asynchronous receiver transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
AC	Corrente alternada
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WEN	<i>Write enable</i>

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	14
1.1 MOTIVAÇÃO.....	14
1.2 OBJETIVO.....	16
1.2.1 Objetivo Geral .....	16
1.2.2 Objetivos Específicos .....	16
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 O SOLO.....	18
2.1.1 Qualidade do solo .....	20
2.2 UMIDADE .....	21
2.2.1 Constante dielétrica do solo .....	25
2.3 CAPACITORES.....	29
2.4 ULTRASSOM.....	32
3 METODOLOGIA.....	36
3.1 HARDWARE.....	36
3.1.1 Placa Lógica.....	36
3.1.1.1 Circuito serial tipo UART e USB.....	39
3.1.1.2 Circuito de aquisição – Ultrassom .....	40
3.1.1.3 Circuito de memória auxiliar .....	42
3.1.1.4 Conectores de expansão e alimentação .....	43
3.1.2 Placa de aquisição - impedanciometria e placa auxiliar .....	45
3.1.2.1 Circuito gerador senoidal.....	46
3.1.2.2 <i>Buffer</i> e filtro passa-faixa.....	48
3.1.2.3 Circuito detector de tensão.....	49
3.1.2.4 Circuito detector de corrente .....	50
3.1.2.5 Amostragem de temperatura.....	51
3.1.2.6 Amostragem do pico de tensão e de corrente.....	52
3.1.2.7 Amostragem da defasagem .....	53
3.1.2.8 Seleção das amostras .....	55
3.1.2.9 Circuito de alimentação e LCD.....	57
3.2 <i>FIRMWARE</i> .....	59
3.3 METODOLOGIA DE TESTE APLICADA.....	61
3.3.1 Protocolo experimental de medição da defasagem.....	62
3.3.2 Protocolo experimental de medição do sinal ultrassônico.....	64
3.3.3 Protocolo final de medição da impedância.....	66
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
4.1.1 Resultados e discussões - método de medição de impedância .....	69
4.1.2 Resultados e discussões - método ultrassônico.....	76
5 CONCLUSÕES .....	79
5.1 Trabalhos Futuros .....	79
REFERÊNCIAS.....	81
ANEXOS .....	88
ANEXO A – Análise do solo .....	89
APÊNDICES.....	90
APÊNDICE A – Testes da variação da fase e corrente em função da umidade .....	90

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Diante do que é vital na natureza, tem-se os três elementos essenciais sendo: o ar, a água e o solo. Destes, o solo é onde abriga as diversas espécies animais e vegetais, donde provem grande parte da alimentação humana. Tal recurso natural, ainda pouco estudado diante de sua importância, ocupa uma posição peculiar ligada às várias esferas que afetam a vida humana, além de servir como substrato principal da produção de alimentos, e uma das principais fontes de nutrientes e sedimentos que vão para os rios, lagos e mares. A natureza, com suas relações dos meios bióticos, abióticos e sócio-econômicos, é sempre um laboratório que precisa ser entendido, para que possamos melhor planejar o uso dos recursos naturais, em particular o solo e suas diversas características (IBAM, 2007, p. 1).

De acordo com Daily et al. (1998, p. 1), existem dois critérios pelos quais se pode julgar o sucesso da humanidade para alimentar-se: (1) a proporção das pessoas que tem garantido o acesso aos requerimentos básicos alimentares, e (2) a extensão da produção global de alimentos que é sustentável. Ainda segundo Daily et al., pesquisas ecológicas sugerem que um incremento de quase 50% na população mundial, somado com a duplicação do PIB por pessoa, poderá até o ano 2030 criar estresses adicionais tanto em ecossistemas locais como globais.

Levantamentos realizados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) das Nações Unidas indicam que um terço da população mundial vive em regiões de moderado a alto stress hídrico, ou seja, com um nível de consumo superior a 20% da sua disponibilidade de água. As estatísticas da OMM demonstram que, nos próximos 30 anos, a situação global das reservas hídricas tende consideravelmente a piorar, caso não ocorram ações para melhoria da gestão da oferta e demanda de água (BERNARDI, 2003, p. 9).

Para assegurar a produção sustentável de alimentos e a utilização sustentável das reservas hídricas, o estudo do solo vem nos últimos anos experimentando avanços tecnológicos importantes, principalmente na agricultura de precisão (MANTOVANI, 2000, p. 79), visando o desenvolvimento de sistemas agrícolas que possam produzir alimentos em quantidades e qualidade suficientes, sem afetar desfavoravelmente recursos do solo e meio ambiente. Diante disso há



um aumento do interesse por parte dos agricultores por sistemas alternativos de produção que aumentem a rentabilidade e melhorem a qualidade de vida no meio rural, além de preservar a capacidade produtiva do solo em longo prazo (EHLERS, 1999 e EMBRAPA, 2000, p. 13 - 14). Neste sentido, põe-se a disposição do agricultor a utilização de equipamentos e produtos de irrigação que minimizam os riscos de perda de produção em épocas de falta de chuva. Porém, em Roque (2008, p. 1) e Leão (2007), tem-se que com a expansão do uso deste recurso e a má utilização destes sistemas, a irrigação tem sido apontada ao longo das últimas décadas, como uma grande consumidora de água, recurso esse que se torna cada vez mais escasso na natureza, fazendo-se necessário que os sistemas de irrigação operem com altos níveis de eficiência, minimizando assim as perdas.

Para a melhoria nos processos de irrigação, o conhecimento da distribuição da umidade faz-se um dos parâmetros cada vez mais necessário, pois está intimamente ligada às propriedades do sistema solo-água-planta, tornando-se indispensável para a prática de uma agricultura sustentável e sem prejuízos ao meio ambiente (SOUZA; MATSURA, 2006, p. 63). Além de viabilizar o uso da irrigação, o conhecimento do teor de umidade do solo é um parâmetro utilizado em estudos hidrológicos, meteorológicos, geotécnicos, na análise de perfis termodinâmicos, na evolução de estruturas baroclínicas, nos padrões de precipitação, dentre outros (GEVAERD et al., 2006).

Como parâmetro geotécnico, o teor de umidade é importante na elaboração de projetos de avaliação do desempenho de estruturas geotécnicas. Na mecânica dos solos, o teor de umidade influi em parâmetros, tais como, resistência ao cisalhamento, deformabilidade, compressibilidade e condutividade hidráulica (ASSIS, 2008).

A umidade do solo, embora seja um conceito físico simples, apresenta dificuldades na sua determinação, de forma a se obter um valor representativo devido à inerente variabilidade espacial e temporal das características físicas do solo (GONÇALVES; FOLEGATTI; SILVA, 1999). Para quantização de água no solo vem sendo desenvolvidos vários equipamentos que determinam suas propriedades baseado em dados de sensores. Um método de quantificação ideal de umidade do solo deve basear-se numa propriedade física dependente apenas do conteúdo de água, também deve ser simples de ser executado, produzindo respostas diretas,

rápidas, confiáveis, de tal forma a não trazer riscos ao operador ou ao ambiente, sendo ainda de custo acessível (LACERDA et al., 2005, p.12).

Pesquisadores vêm ao longo das últimas décadas estudando novas técnicas de caracterização da umidade no solo, assim como, avaliando os métodos já existentes, objetivando sempre encontrar um método mais próximo ao considerado ideal, garantindo assim um mínimo de perturbação no ambiente. Em 1993, Ribeiro constatou que um dos maiores problemas enfrentados pelos produtores de citros no Brasil se encontra na falta de um método no qual se pode medir a umidade do solo economicamente e corretamente, para a regularização da irrigação, problemas esses, embora minimizados pelos avanços tecnológicos na área, ainda freqüentes nos dias atuais.

## 1.2 OBJETIVO

### 1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo realizar o estudo de novas técnicas de medição de umidade do solo, utilizando-se de conhecimento já adquirido em técnicas consagradas no meio científico, de modo, ao final do estudo, desenvolver um equipamento que permita efetuar medições de umidade do solo utilizando técnicas de ultrassom e de impedanciometria.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Pesquisar e desenvolver sensores de umidade utilizando técnicas de ultrassom e impedanciometria de forma a permitir a obtenção de leituras em instantes de tempo muito pequenas, da ordem de milissegundos, e de maneira a ser possível o uso de tais técnicas de medição da umidade em campo, sem necessitar de coleta de amostras para posterior análise em laboratório. Para tal, segue-se:

- ✓ Identificar o melhor método de aquisição do sinal ultrassônico, pulso-eco ou transmissão-recepção;
- ✓ Definir transdutores de ultrassom que possuam um bom casamento de impedância acústica com o meio;

- ✓ Desenvolver *hardware* dedicado que possa realizar tanto o pré-tratamento dos sinais de ultrassom, quanto dos sinais de defasagem da corrente e tensão;
- ✓ Desenvolver um *firmware* capaz de realizar o pré-tratamento dos sinais ultrassônicos e de defasagem da corrente e tensão;
- ✓ Analisar e implementar metodologia capaz de evidenciar a repetitividade das leituras dos sensores de teor de umidade quando submetidos ao mesmo teor de umidade.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos, sendo o que se apresenta.

No capítulo 1, é apresentada uma introdução ao estudo do solo visando a importância da caracterização da umidade, e as técnicas usadas como referência para execução do presente estudo.

No capítulo 2, tem-se a fundamentação teórica onde são descritas as técnicas de maior relevância utilizadas no desenvolvimento do sistema de medição de umidade, assim como uma descrição dos conceitos de sistemas ultrassônicos e de medição de defasagem entre tensão e corrente.

No capítulo 3 descreve-se a metodologia aplicada na validação das leituras de variação de umidade relativa das amostras e descreve o *hardware* e *firmware* desenvolvidos para a aplicação, assim como testes iniciais utilizados para a compreensão da metodologia e técnicas a serem aplicadas, de forma a minimizar os riscos no desenvolvimento do sistema de medição do teor de umidade, elucidando os principais requisitos necessários para o mesmo.

O capítulo 4 documenta os resultados obtidos com o sistema desenvolvido para ambos os métodos de medição propostos, verificando a repetitividade da leitura das amostras.

Por fim, o capítulo 5 discute os resultados obtidos com a aplicação dos métodos e metodologia usados na compreensão das variações dos sinais com o aumento da umidade relativa, assim como se propõe linha de estudo para novos trabalhos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 O SOLO

O solo é um recurso natural essencial à vida na Terra, na ausência do solo, a vida na Terra estaria restrita aos oceanos (KUTILEK; NIELSEN, 1994). Este recurso natural é um fator essencial para a produção de alimentos e de matéria prima, sendo que a conservação e recuperação do solo são fatores primordiais para manutenção de altos índices de produtividade dos sistemas agrícolas (CASTRO, 1991, p. 111). Visto sua importância, faz-se necessário o desenvolvimento de uma “consciência pedológica”, a partir de um processo educativo que privilegie uma concepção de sustentabilidade na relação homem-natureza (MUGGLER et al., 2006, p. 733).

O solo pode ser interpretado de diversas maneiras, a depender dos objetivos e enfoque científico. Para um geólogo, o solo pode ser visto como produto do intemperismo do material de origem, constituindo-se em um manto inconsolidado que recobre as rochas e faz parte de uma seqüência de eventos geológicos. Um engenheiro civil ou de obras pode considerá-lo como material escavável e matéria-prima para construções de aterros, estradas e barragens, entre outros. O agrônomo já o vê como uma camada superficial de terra arável e possuidora de vida microbiana, capaz de sustentar plantas (ÁVILA, 2009, p. 14).

Para a pedologia, do grego *pedon* + *logos* (conhecimento do solo), é a *Genetic Soil Science*, surgida com Vassilii Dockuchayev no final do século XIX, reconheceu o solo como um corpo dinâmico e naturalmente organizado que pode ser estudado por si só, tal como as rochas, as plantas e os animais (SILVA; FALCÃO e SOBRINHO, 2008, p. 101).

Dockuchayev apud Lepsch (2002, p. 6-7), ao estudar duas regiões distintas uma localizada nas planícies ucranianas e outra a leste de Moscou, constatou que os solos eram compostos de uma sucessão de camadas horizontais, que se iniciavam na superfície e terminavam nas rochas subjacentes. Reconheceu e interpretou essas camadas como resultantes da ação conjunta de diversos fatores, dentre estes o clima, que deram origem ao solo e verificou também que cada tipo de solo poderia ser caracterizado pela descrição detalhada das mesmas.

No Brasil, a classificação brasileira de solos, definida pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), começou a ser estruturada em 1979, através de aproximações (documentos de trabalho), num total de quatro, sendo concluído e publicado pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) em 1999. O Sistema foi testado através de viagens de correlação e classificação de solos, excursões técnicas de congressos de solos, e também nos levantamentos pedológicos executados em várias regiões do Brasil (JACOMINE, 2007), na qual define-se solo como a coleção de corpos naturais, constituídos por parte sólida, líquida e gasosa, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos, que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, contém matéria viva e podem ser vegetados na natureza, onde ocorrem. Ocasionalmente podem ter sido modificados por atividades humanas (EMBRAPA, 2006). As partículas da fase sólida variam grandemente em tamanho, forma e composição química e a sua combinação nas várias configurações possíveis forma a chamada matriz do solo (REINERT; REICHERT, 2006).

A figura 2.1, apresenta o complexo trifásico: sólido, líquido e gasoso, com a representação esquemática das fases do solo.

No complexo trifásico dos solos, os sólidos formam a chamada matriz do solo, em que o espaço formado entre os sólidos é chamado de espaço poroso, ou poros. O tamanho e forma dos poros são diretamente determinados pelo tamanho, forma e arranjo dos sólidos do solo. A solução do solo, freqüentemente chamado de “água do solo” consiste de água com sais minerais e substâncias orgânicas dissolvidos. A composição da fração gasosa, também chamada de “ar do solo” é, de grosso modo, igual à da atmosfera, porém, ela contém mais  $\text{CO}_2$  e menos  $\text{O}_2$ , além de apresentar uma umidade relativa sempre próxima a 100%. A água e os gases ocupam o espaço poroso, os vazios entre os sólidos (LIER, 2007).

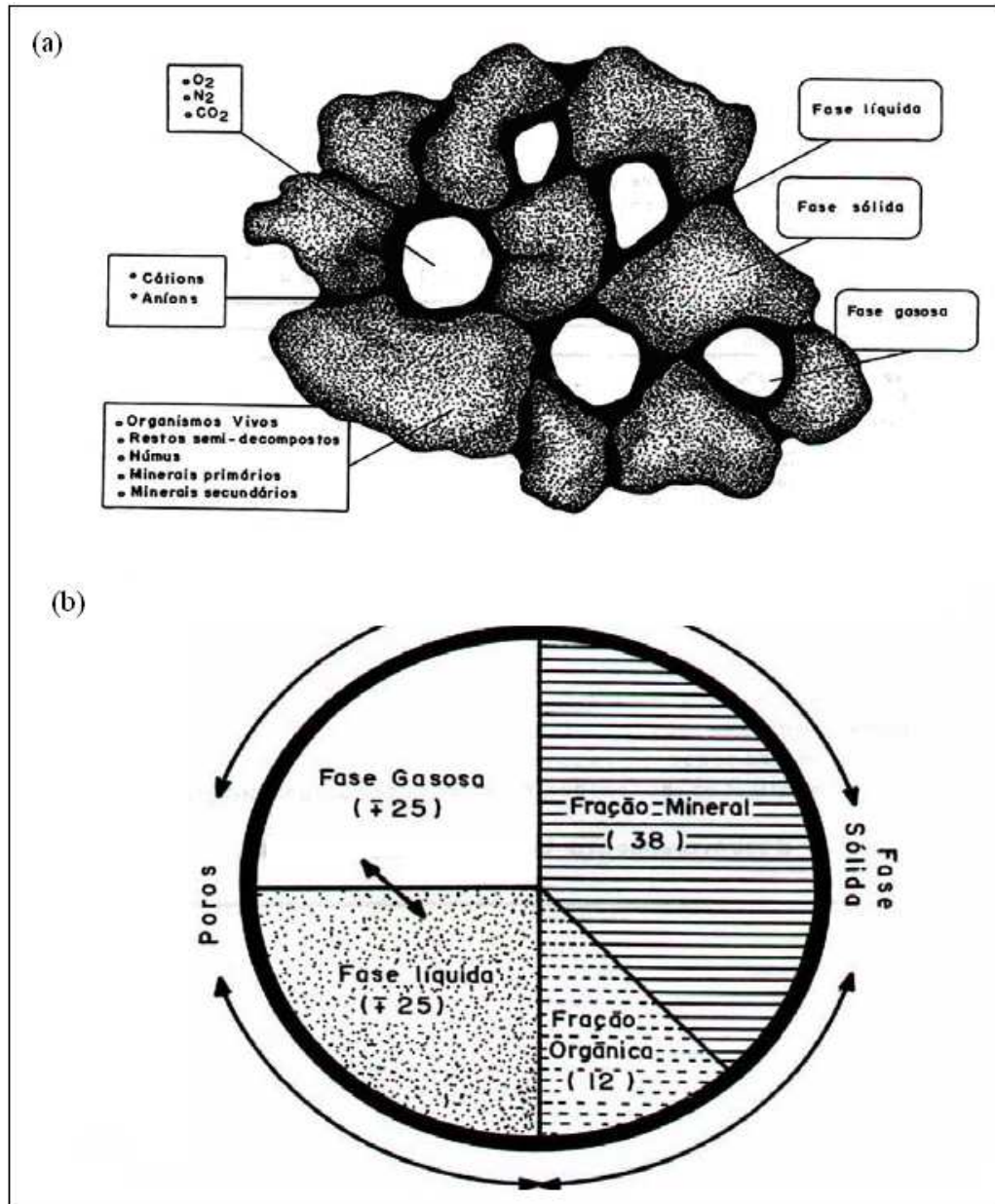


Figura 2.1 – Apresentação do complexo trifásico. Em (a) apresenta-se a composição básica do solo com o sistema trifásico: sólido, líquido e gasoso; (b) representação esquemática das fases do solo.

Fonte: Adaptado de SEBRAE (2005)

### 2.1.1 Qualidade do solo

A qualidade do solo é um componente crítico da sustentabilidade em agricultura (LARSON; PIERCE, 1994), seu entendimento é fundamental tendo em vista a necessidade de adoção de estratégias para um manejo sustentável dos diversos sistemas de produção (SANS, 2000 e TÓTOLA; CHAER, 2002).

A definição de um solo fisicamente ideal é difícil devido ao tipo e natureza das variações físicas dos solos que ocorrem ao longo da profundidade, na superfície da paisagem e ao longo do tempo (REINERT; REICHERT, 2006). Segundo Doran e Parkin (1994), pode-se identificar a qualidade do solo como sendo a capacidade funcional do mesmo em sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde das plantas e animais. Tais autores, propõem também um índice para avaliação do solo, relacionado com a produção de alimentos e fibras, com a qualidade do ar, das águas subterrâneas e superficiais e com a qualidade dos alimentos produzidos.

Segundo Aguiar (2008), os indicadores de qualidade do solo devem ser sensíveis às variações de manejo, correlacionar-se com as funções do solo, ser de fácil mensuração e de baixo custo, que possibilitem o entendimento dos processos do ecossistema, sendo a própria curva de retenção de água no solo considerada um indicador que pode ser usado na avaliação da qualidade do solo, assim como o intervalo hídrico ótimo (IHO), que integra em um único parâmetro os efeitos da densidade, aeração, resistência à penetração de água no solo sobre o desenvolvimento das plantas, sendo capaz de indicar situação de estresse.

Um solo é considerado fisicamente ideal para o crescimento de plantas quando apresenta boa retenção de água, bom arejamento, bom suprimento de calor e pouca resistência ao crescimento radicular. Paralelamente, boa estabilidade dos agregados e boa infiltração de água no solo são condições físicas importantes para qualidade ambiental dos ecossistemas (REINERT; REICHERT, 2006).

## 2.2 UMIDADE

A umidade é um parâmetro importante para o conhecimento da resistência mecânica do solo à penetração, mostrando-se útil na avaliação da qualidade física do mesmo por permitir a identificação de valores potencialmente limitantes ao crescimento das raízes, além de possibilitar o estabelecimento de valores críticos de umidade e densidade (IMHOFF; SILVA; TORMENA, 2000). A umidade também se faz importante em estudos de IHO, na caracterização da consistência do solo, no conhecimento do ponto de murcha permanente (PROCÓPIO et al., 2004), usado como parâmetro para a irrigação de plantações (COLETTI, 2000), na fertirrigação e controle de salinidade (DIAS et al., 2005), no controle de perdas excessivas de água

por percolação profunda, com risco de contaminação do lençol freático por agroquímicos (ANDRADE et al.,1998), entre outras aplicações importantes na caracterização e cuidado do solo.

Segundo Libardi (1999), a retenção de água pelo solo pode ocorrer segundo dois processos, sendo no primeiro, a retenção ocorre nos microporos dos agregados podendo ser explicado pelo fenômeno da capilaridade, todavia, não se pode dizer que o solo é um simples tubo capilar e sim uma composição irregular de poros e canais formados pelas partículas sólidas; no segundo processo a retenção ocorre nas superfícies dos sólidos do solo devido à adsorção.

Saarenketo (1998), propõe classificar a água no solo e seus agregados como: (1) de adsorção de água, também chamado de água higroscópica, (2) água viscosa, ou água capilar e (3) água livre ou também chamada de água gravitacional. A distribuição de água no solo é descrito na figura 2.2.

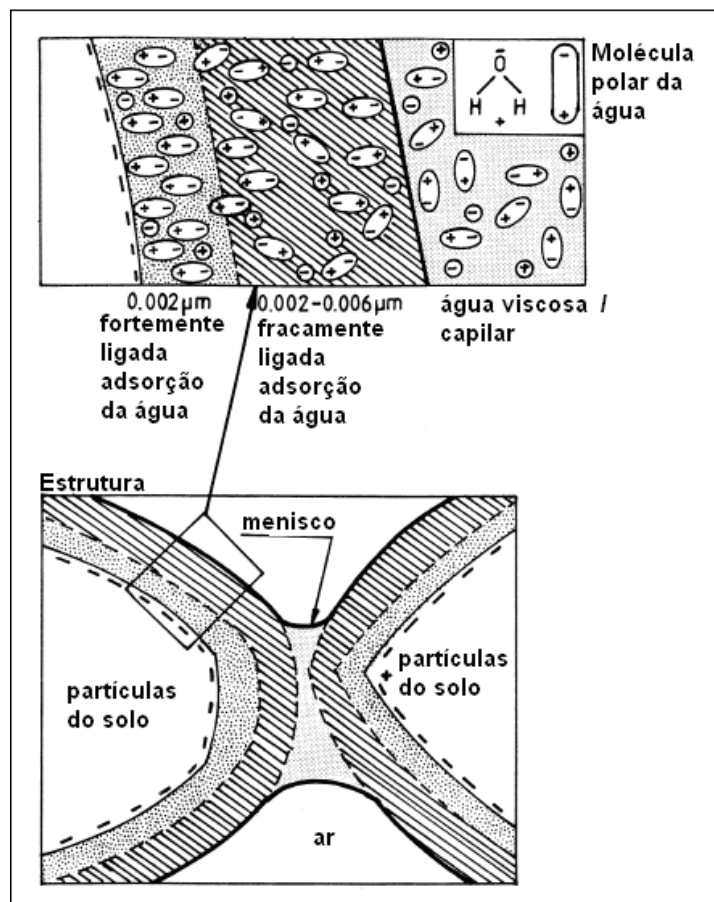


Figura 2.2 – Estrutura de ligação da água no solo, contendo ligações fortemente e fracamente ligadas por adsorção e a água viscosa.

Fonte: Saarenketo (1998, p. 74)



O método tradicional de se medir umidade do solo é o gravimétrico, que consiste na coleta de amostras deformadas e na relação do peso do solo úmido e seco. A massa de uma amostra é obtida em laboratório através da pesagem da mesma. Para obtenção da massa dos sólidos retira-se a água da amostra, colocando-a numa estufa entre 105 °C e 110 °C (NBR 06457, 1986), até a sua massa não diminuir mais (KIEL, 1979; REICHARDT, 1985). A umidade com base em peso é dada por:

$$W = \frac{m_a}{m_s} \quad (2.1)$$

onde “W” é a umidade com base em peso (kg/kg); “m<sub>a</sub>” massa de água contida na amostra (kg); “m<sub>s</sub>” massa do solo seco (kg).

A massa total de uma amostra de solo “m”, (kg) é dada pela massa dos seus componentes: massa dos sólidos “m<sub>s</sub>” (kg), massa da água “m<sub>a</sub>” (kg) e massa do ar “m<sub>ar</sub>” (kg). Como a densidade do ar é muito menor que a dos demais componentes do solo (aproximadamente 1.000 vezes menor que a da água), a sua massa é normalmente desprezada (LIER, 2007). Assim:

$$m = m_s + m_a + m_{ar} \cong m_s + m_a \quad (2.2)$$

Outra forma de se calcular a umidade é com base no seu volume, esse método é pouco utilizado, pois requer uma amostra indeformada para a determinação do volume, dificultando assim análises com métodos tradicionais. (REICHARDT, 1985). A umidade com base em volume é dada por:

$$\theta = \frac{V_a}{V_T} \quad (2.3)$$

em que: “θ” é a umidade com base em volume (kg<sup>3</sup>/kg<sup>3</sup>); “V<sub>a</sub>” o volume de água contida na amostra (m<sup>3</sup>) e V<sub>T</sub> o volume total de solo (m<sup>3</sup>).

Os valores típicos de “θ” atingem até 60%, devido à porosidade do solo, podendo esse valor variar entre 40% e 60% (ELLER; DENOTH, 1995). Entende-se como porosidade de uma amostra de solo “α”, (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) a fração do seu volume

ocupada por água “ $V_a$ ” e ar “ $V_{ar}$ ”(m<sup>3</sup>), em relação ao volume total da amostra “ $V_T$ ” (m<sup>3</sup>);

$$\alpha = \frac{V_a + V_{ar}}{V_T} \quad (2.4)$$

A densidade do solo é uma característica que apresenta variações no espaço e no tempo. As densidades da água “ $\rho_a$ ” (kg.m<sup>-3</sup>) e do ar “ $\rho_{ar}$ ” (kg.m<sup>-3</sup>) no solo são mais ou menos fixos: 1000 kg.m<sup>-3</sup> e 1,3 kg.m<sup>-3</sup> aproximadamente (LIER, 2007). A densidade dos sólidos “ $\rho_s$ ” (kg.m<sup>-3</sup>) e a do solo “ $\rho$ ” (kg.m<sup>-3</sup>) podem variar, de solo para solo, e são parâmetros importantes por refletirem indiretamente outras características do solo como porosidade e grau de compactação. Elas são calculadas pelas seguintes equações:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (2.5)$$

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_a} \quad (2.6)$$

$$\rho = \frac{m_s}{V_T} \quad (2.7)$$

Uma técnica utilizada para se determinar a umidade com base em volume é determinar a umidade com base em peso e multiplicar pela densidade do solo previamente determinada para o local. Deduz-se facilmente que a relação entre a umidade volumétrica “ $\theta$ ” e a gravimétrica “ $W$ ” é dada pela equação;

$$\theta = W * \frac{\rho_s}{\rho_a} \quad (2.8)$$

Os métodos de determinação de umidade do solo podem ser classificados em diretos e indiretos (MANIERI; VAZ; MARIA, 2007, p. 192).

Os métodos diretos são geralmente destrutivos, por necessitar de coleta do solo para posterior medição em laboratório dos índices de umidade, o que dificulta o monitoramento maciço em diversos locais e em diferentes profundidades. Como

exemplo pode-se citar o método gravimétrico, que determina o teor de umidade através da pesagem em balança de precisão antes e depois da secagem das amostras em estufa. Esse método é considerado padrão, devido à sua precisão e simplicidade, no entanto, esta técnica torna-se insatisfatória em situações nas quais se necessita de rapidez na obtenção dos resultados e quando há um grande número de determinações a serem feitas (ASSIS, 2008, p. 23).

Os métodos indiretos são aqueles por meio dos quais se torna possível determinar a quantidade de água presente no solo, utilizando-se medidas de características dos mesmos, relacionadas com a umidade. Esses métodos também apresentam algumas desvantagens, tais como a necessidade da realização de uma curva de calibração, que pode ser influenciada por características do solo e por variações decorrentes do próprio meio ambiente. A grande vantagem desse método está na possibilidade de realizar a medição da umidade em campo, sem necessitar a coleta de amostras para posterior avaliação em laboratório, garantindo um mínimo de perturbação no ambiente para que a medição não seja afetada pelo procedimento adotado (GEVAERD; FREITAS, 2006, p. 2 - 3).

Dos métodos indiretos em estudo pode-se citar os seguintes: sonda de nêutrons (OIEA, 2003), tensiômetros combinados com a resistência elétrica do solo (LEÃO, 2004), tomografia computadorizada com raio "X" e raios gama (PEDROTTI, 2003), ressonância magnética (VOTRUBOVA et al., 2000), reflectometria no domínio da frequência (FDR) (VELDKAMP; O'BRIEN, 2000), a reflectometria no domínio do tempo (TDR) (NOBORIO, 2001), dentre outros.

### 2.2.1 Constante dielétrica do solo

O solo em seu sistema trifásico é um meio heterogêneo em que os sólidos e líquidos desempenham um papel essencial nos fenômenos elétricos espontâneos que ocorrem no solo e também no comportamento dos campos elétricos, criados artificialmente no solo. O ar por sua vez pode muitas vezes ser considerado como um dielétrico quando comparado com as propriedades elétricas dos outros dois meios. Para uma melhor compreensão da caracterização da umidade do solo através da aplicação de campos elétricos, é preciso considerar algumas representações clássicas da teoria básica da eletricidade.

Dentre os métodos que avaliam alterações na constante dielétrica (ou permissividade dielétrica) do solo em função da quantidade de água, destaca-se a reflectometria no domínio do tempo (TDR), surgido a princípio, segundo Nadler et al. (1996), como um método para localização de falhas nos sistemas elétricos de cabeamento. Em 1974, Hipp, Hoekstra e Delaney e, em 1997, Davis e Annan foram os primeiros pesquisadores a verificar que havia uma maior dependência da constante dielétrica em relação ao conteúdo de água quando comparada à composição e à densidade do solo. O maior avanço dessa técnica surgiu após estudos de Topp et al. em 1980, ao aplicarem um sinal de alta frequência em cinco tipos de solo e analisarem os desvios no tempo entre a transmissão e recepção do sinal. Confirmaram que 93 % das variações da constante dielétrica era devido ao conteúdo de água do solo, sugerindo ainda que fatores como temperatura, tipo de solo, densidade do solo e conteúdo de sal tinham efeito insignificante. Em estudos posteriores, foram comparados valores obtidos em diferentes locais, e efetuado também leituras repetidas em um determinado local, verificando-se uma grande correlação entre os resultados quando comparados ao método gravimétrico, podendo assim dizer que o princípio que rege a reflectometria no domínio do tempo permite medição confiável da umidade no solo (TRINTINALHA et al., 2004, p. 353-360).

A tabela 2.1 apresenta a permissividade relativa de alguns constituintes do solo.

**Tabela 2.1 - Permissividade relativa de alguns constituintes do solo.**

<b>Material</b>	<b>Permissividade Elétrica <math>\epsilon_r</math></b>
Ar	1
Água (20 °C)	80
Gelo (-3 °C)	3
Basalto	12
Arenito	9 - 11
Granito	7 - 9
Silte seco	3,5
Areia seca	2,5

**Fonte: Curtis e Defendorf, 1929 (apud NOBORIO, 2001, p.217)**

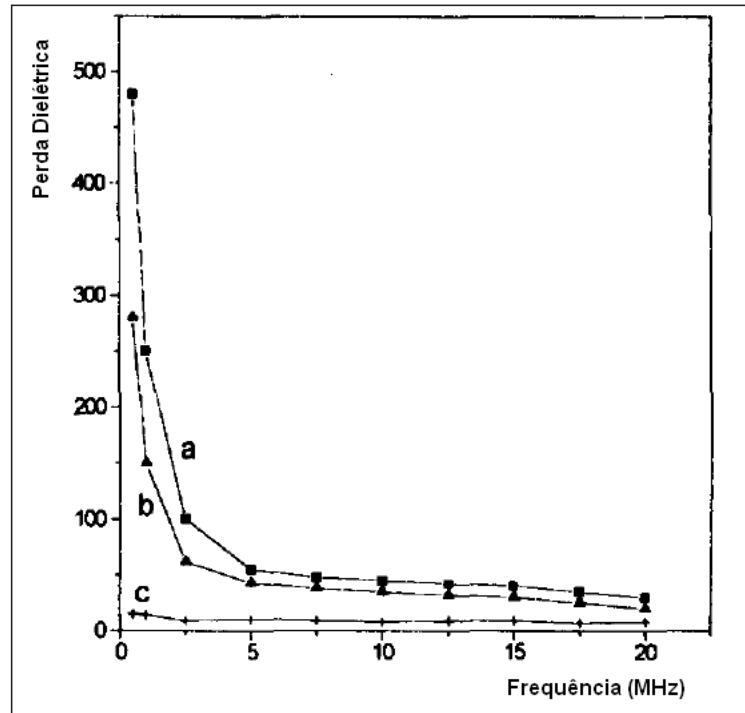
As propriedades dielétricas dos materiais “ $\epsilon_r$ ” podem ser descritas por uma representação complexa da constante dielétrica, como a seguinte:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j \epsilon_r'' \quad (2.9)$$

onde  $\epsilon_r'$  é a parte real da permissividade relativa, medida pela polaridade dos materiais constituintes, incluindo a água, e  $\epsilon_r''$  é a parte imaginária da permissividade, que representa principalmente a absorção da energia pela condução dos íons e, ainda mais raramente, pelas perdas dielétricas.

Uma análise detalhada da resposta dielétrica do solo apresenta, em geral, um efeito significativo do teor de água, mas, principalmente nas frequências mais baixas, também ocorre uma influência significativa devido à textura do solo (caracterizado pela distribuição de tamanho de grão, que é presumível devido à interação entre as fases sólidas e líquidas), estrutura (arranjo geométrico da fração sólida do solo) e composição química (TOPP; DAVIS; ARMAN, 1980). Para minimizar os efeitos da frequência e depender apenas fracamente do tipo de solo, sugere-se, segundo Gschnitzer e Eller (1995), o aumento das frequências para valores que se estende desde 30 MHz até cerca de 200 MHz.

A figura 2.3 apresenta a relação entre a constante dielétrica em função da frequência para três níveis de umidade relativa. Na figura 2.4 se apresenta a variação da perda dielétrica em função da umidade para a frequência de 35 MHz.



**Figura 2.3 - Perda dielétrica de uma amostra específica de solo sob pastagem com densidade de  $1,12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  e fração orgânica  $< 5\%$ , avaliada em três níveis de umidade: a,  $W = 65\%$ ; b,  $W = 55\%$ ; c,  $W = 7,4\%$ .**

**Fonte: Adaptado de ELLER (1995, p. 140).**

Segundo análises de Drnevich et al. (2001), constatou-se que as constantes dielétricas aparentes dos solos sofrem variações expressivas em função da temperatura do mesmo quando submetidas a variações de 4 a 40 °C, em que se pode verificar a tendência de diminuição da constante dielétrica da areia com o aumento da temperatura, comportamento similar ao da água, porém menos acentuado. Já em argilas, essa tendência foi oposta, com aumento da constante dielétrica relacionado diretamente com o acréscimo da temperatura. Embora ocorram variações nas constantes dielétricas em função da temperatura, alguns autores afirmam que os efeitos da temperatura na determinação da constante dielétrica podem ser negligenciados em intervalos de temperatura entre 5 a 20 °C.

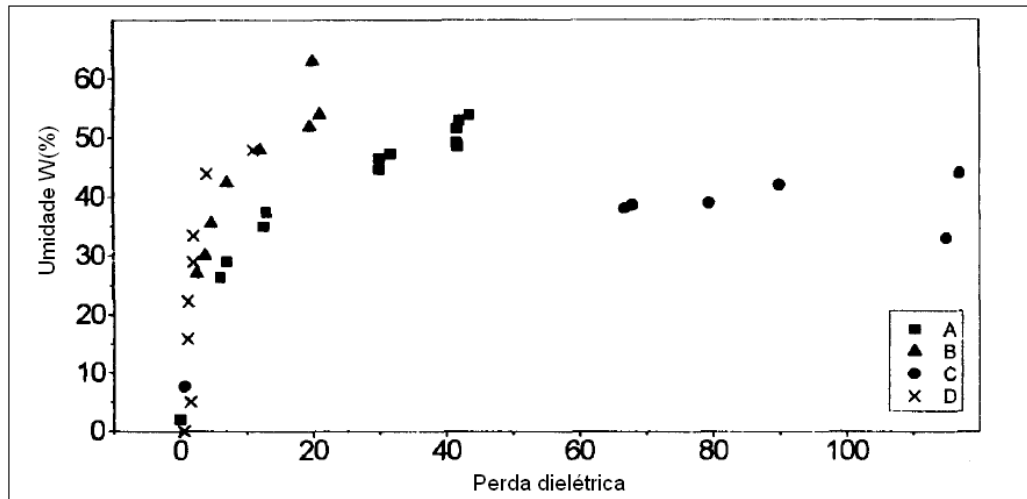


Figura 2.4 – Perdas dielétricas  $\epsilon$  em função da umidade W (%), na frequência de 35 MHz para diferentes tipos de solo. A, no solo de pastagem; B, horizonte  $A_H$  de terra marrom; C, húmus; D, solo arenoso.

Fonte: Adaptado de ELLER (1995, p. 140).

### 2.3 CAPACITORES

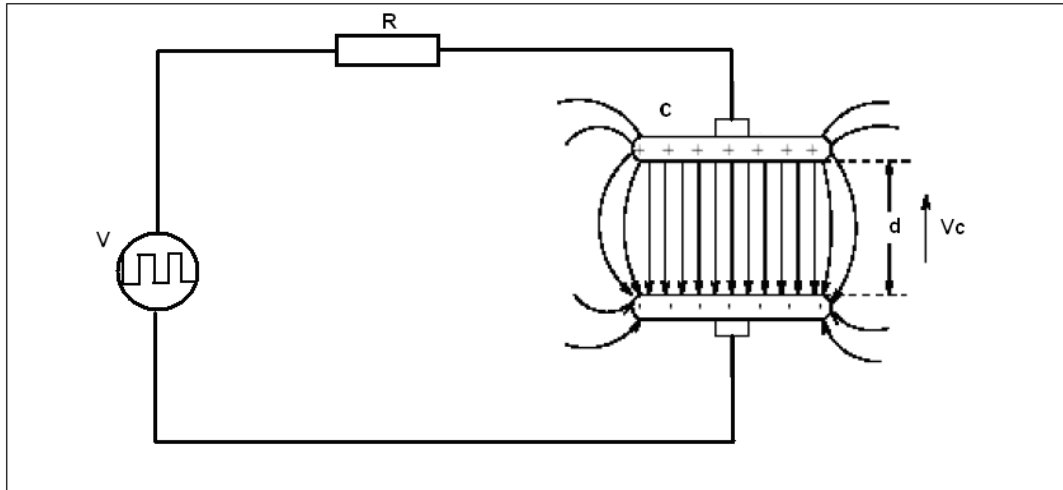
Segundo Paris e Hurd (1984), qualquer par de condutores, separados por um meio dielétrico, constitui um capacitor. Segundo Hickey (1961), o próprio ar é um dielétrico, e diferentes dielétricos produzem diferentes capacitâncias. A habilidade de um material dielétrico aumentar a capacitância é denominada constante dielétrica. A constante dielétrica é uma propriedade intrínseca ao material, devido ao fato dos átomos de diferentes materiais possuírem arranjos de elétrons nos orbitais, sendo a capacitância (C) definida como:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.10)$$

onde “Q” é a quantidade de carga necessária para aumentar a tensão “V” de 1 V entre duas hastes ou placas paralelas, a uma dada distância, preenchidas com material isolante. Considerando um capacitor de placas paralelas e planas, tem-se:

$$C = \epsilon \cdot \frac{a \cdot b}{d} \quad (2.11)$$

em que a capacitância “C” é medida em Farads ( $C \cdot V^{-1}$  ou  $C^2 \cdot (N \cdot m)^{-1}$ ), sendo “a\*b”, a área das placas, “d” a distância que as separa e “ε”, a permissividade do meio dado por  $\epsilon_r \cdot \epsilon_0$ . A figura 2.5 apresenta um circuito RC.



**Figura 2.5 – Circuito RC.**

Fonte: Adaptado de Silva (2005, p.35).

De acordo com DeCarlo e Pen-Min (1995) explicam que a capacitância (C) vista na figura 2.6 é uma medida da capacidade de armazenamento do capacitor em um campo elétrico, sendo que este campo elétrico armazena energia. A corrente do capacitor e a tensão, por sua vez, são dadas por:

$$i_c(t) = C \cdot \frac{dv_c(t)}{dt} \quad (2.12)$$

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt \quad (2.13)$$

onde “ $v_c$ ” é a tensão no capacitor em volts, “ $i_c$ ” é a corrente série, em amperes. Para o caso especial em que a tensão no capacitor é constante, deduz-se conforme equações anteriores que o capacitor se comporta como um circuito aberto ( $i = 0$ ). A quantidade de “resistência” de um capacitor, sob regime de corrente alternada (AC), é conhecida como reatância capacitiva, e a mesma varia conforme varia a frequência do sinal AC. A reatância capacitiva é dada por:

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (2.14)$$



onde, " $X_C$ " é a reatância capacitiva (Ohms,  $\Omega$ ) e " $f$ " a frequência do sinal AC (Hertz, Hz).

Em circuitos de corrente alternada (CA) puramente resistivo, as ondas de tensão e de corrente elétrica estão em fase, ou seja, mudando a sua polaridade no mesmo instante em cada ciclo. Quando cargas reativas estão presentes, tais como capacitores e indutores, o armazenamento de energia nessas cargas resulta em uma diferença de fase entre as ondas de tensão e corrente conforme evidenciado na figura 2.6.

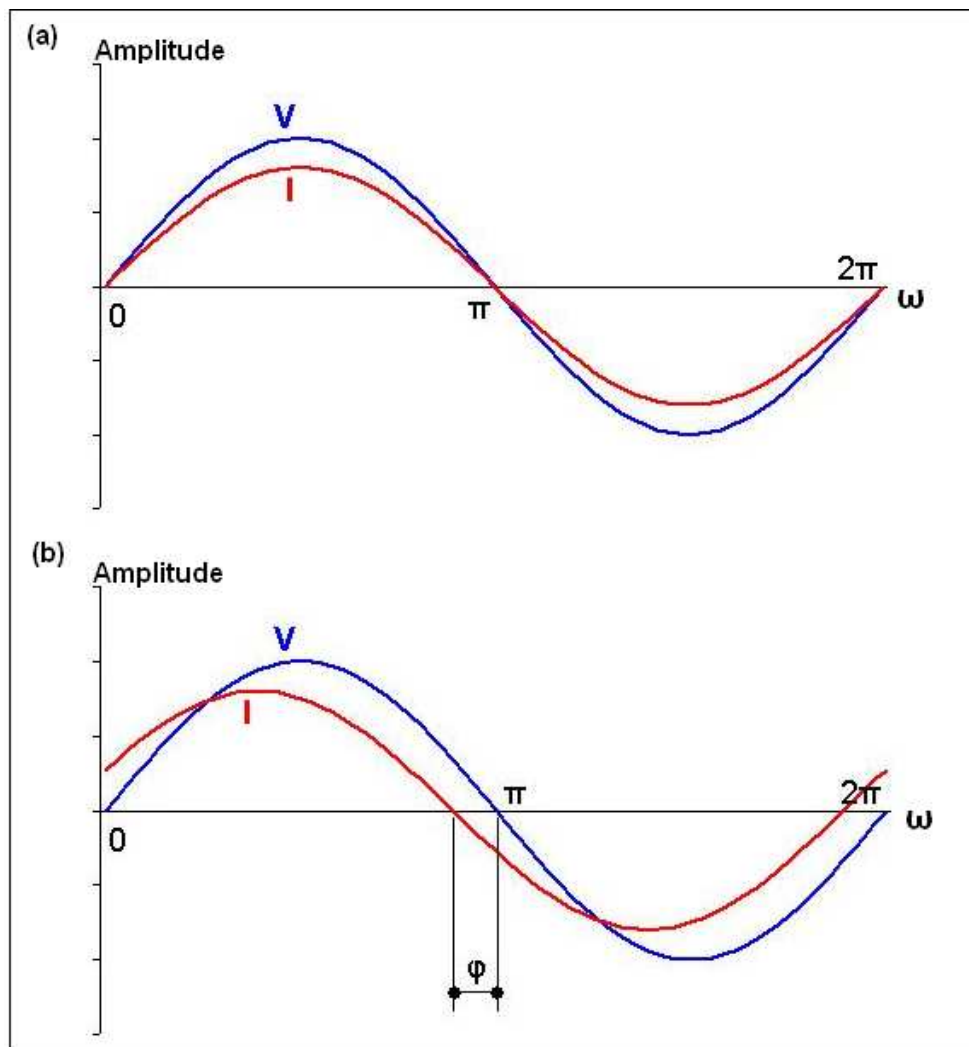


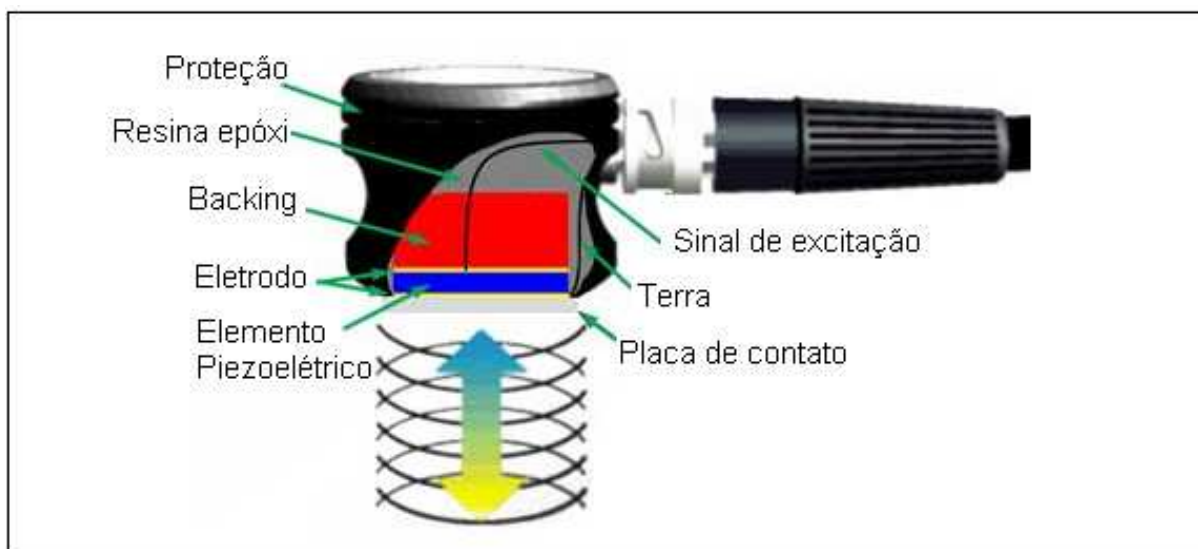
Figura 2.6 – Em (a) apresenta o sinal da tensão V e corrente I aplicadas em cargas resistivas; (b) apresenta o adiantamento  $\phi$  da corrente I em relação à tensão quando aplicadas em cargas capacitivas.

Fonte: Adaptado de Eletrônica24h (2010).

## 2.4 ULTRASSOM

O termo ultrassom é utilizado para referenciar a técnica que utiliza ondas mecânicas com frequências superiores a 20 kHz, acima do espectro audível pelo ser humano, para estudar meios líquidos, sólidos ou gasosos. A onda ultrassônica constitui-se de um distúrbio mecânico de um meio, que se propaga de molécula a molécula a uma determinada velocidade, causando variação na densidade ou pressão do meio ao seu redor, não podendo ser propagada no vácuo. Basicamente as ondas ultrassônicas podem se propagar em três maneiras: longitudinalmente, transversalmente e superficialmente (DACIUK, 2008; FISH, 1990).

Em geral para se obter um sinal ultrassônico se faz uso de transdutores (figura 2.7) constituídos por lâminas de cristal que possuem a capacidade de responder a uma tensão elétrica, gerando deformações físicas no cristal. Este fenômeno, denominado piezoelectricidade é uma propriedade natural de certos cristais e substâncias cristalizadas que apresentam anisotropia, ou seja, a capacidade de reagir diferentemente de acordo com a direção de propagação de um fenômeno físico sobre si, como luz e o calor.



**Figura 2.7 – Descrição interna de um sensor ultrassônico.**

Fonte: Adaptado de NDT Resource Center (2010).

A velocidade de uma onda ultrassônica, segundo Krautkrämer e Krautkrämer (1990), é caracterizada pelo material que está atravessando e é constante para um material independente da frequência e comprimento de onda em que:

$$c = f \cdot \lambda \quad (2.15)$$

onde, “c” velocidade do som no material (m/s), “f” frequência principal (ou frequência fundamental em Hz) e “λ” comprimento de onda (m).

Apesar de a velocidade do som ser considerada uma constante característica de cada material, alguns fatores como a temperatura podem acarretar variações consideráveis para cada meio. Como um exemplo, a velocidade do som no ar pode variar em 1,007 vezes na faixa de 0 a 30 °C, com pressão de 101,325 kPa (Wong, 1985).

Uma característica importante na caracterização de um meio se constitui na impedância acústica “z” (kg/m<sup>2</sup>s). Essa propriedade é definida como a capacidade de um meio se opor à vibração de suas partículas, frente à passagem de ondas ultrassônicas, indicando a facilidade com que uma onda se desloca no meio. Existem diferentes formas de expressar a impedância acústica, no entanto, usa-se comumente a impedância acústica característica do meio ou resistência acústica, que é obtida pela equação a seguir: (FREDERICK, 1965; WEBSTER, 1998)

$$Z = \rho \cdot c \quad (2.16)$$

onde, “ρ” é a densidade do meio e “c” a velocidade de propagação da onda no meio. Sendo a pressão aplicada no meio “p” definida como:

$$p = \rho \cdot c \cdot v \quad (2.17)$$

pode-se chegar na relação entre a impedância acústica do meio em relação a pressão aplicada “p” e a velocidade da partícula “v” (m/s) com sendo:

$$Z = \frac{p}{v} \quad (2.18)$$

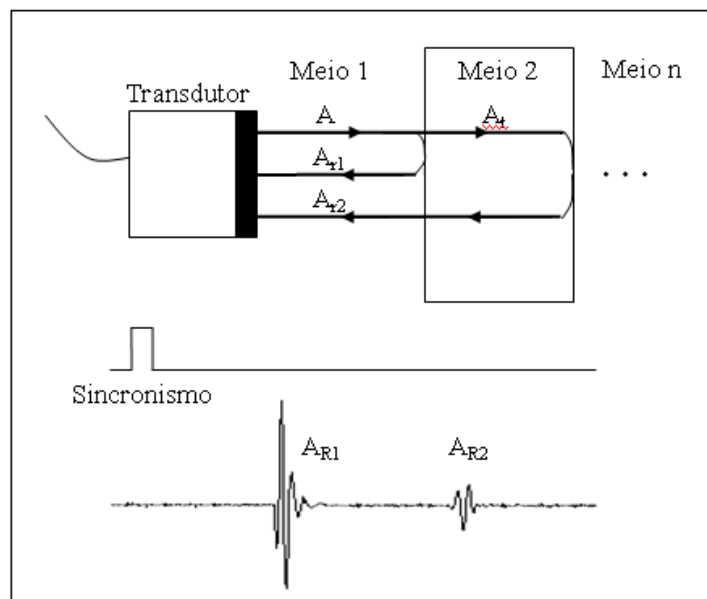
A tabela 2.2 mostra a impedância característica de diversos meios, assim como sua velocidade e atenuação.

Ao colidir com um meio ou ao encontrar uma interface entre dois meios as ondas ultrassônicas podem sofrer reflexão, refração ou difração. Baseados nesse comportamento dois métodos experimentais são geralmente utilizados para caracterização de meios biológicos e não biológicos por ultrassom: o método pulso-eco (figura 2.8), onde um transdutor é utilizado para transmitir e receber os sinais e o método transmissão-recepção (figura 2.9), onde utiliza-se dois transdutores, um transmissor e outro receptor. A combinação desses dois métodos permite obter informações sobre distância entre objetos, velocidade de propagação e atenuação de ondas ultrassônicas nos meios (MAIA, 2001).

**Tabela 2.2 - Propriedades acústicas de vários meios.**

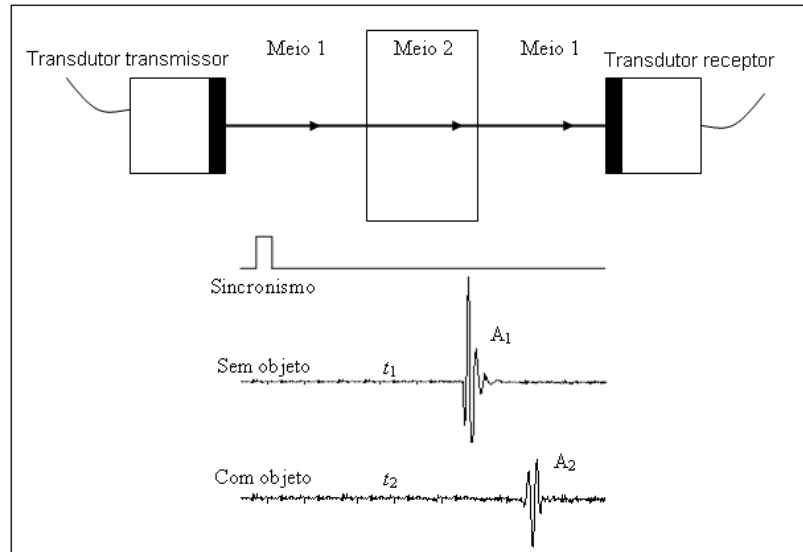
Material	Velocidade $c$ (m/s)	Impedância $Z = \rho c$ ( $10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ )	Atenuação $\alpha$ 1 MHz (dB/cm)	Dependência de $\alpha$ com a frequência $f$
Ar	330	0,0004	1,2	$f^2$
Alumínio	6300	17	0,018	$f$
Gordura	1460 - 1470	1,4	0,6	$f$
Água	1520	1,5	0,002	$f^2$
PVC	2400	2,5	0,35	$f^2$

Fonte: Adaptado de Bronzinho (1986) e Young (1990).



**Figura 2.8 – Transdutor ultrassônico trabalhando no modo pulso-eco.**

Fonte: Adaptado de Assef (2006).



**Figura 2.9 – Transdutor ultrassônico trabalhando no modo transmissão-recepção.**  
Fonte: Adaptado de Assef (2006).

### 3 METODOLOGIA

Antes da concepção do sistema, realizou-se o estudo da caracterização do solo através de aparelho comercial de medição de defasagem entre tensão e corrente, assim como utilizou-se placas padrões, desenvolvidas pelo laboratório de ultrassom da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), para a excitação dos sensores, objetivando assim a diminuição dos riscos na elaboração do projeto.

A metodologia do projeto está descrita em três etapas, sendo: *hardware*, *firmware* e metodologia dos testes.

#### 3.1 HARDWARE

Buscou-se realizar um *hardware* capaz de analisar tantos os sinais ultrassônicos quanto a fase da impedância, para isso dividiu-se o sistema em duas placas, sendo a primeira chamada de placa lógica ou placa de controle, que se incumbirá de realizar a digitalização dos sinais e servir de interface com o usuário, a segunda chamada de placa de aquisição – impedanciometria, se encarregará de gerar o sinal de excitação para o sensor de impedanciometria de placas paralelas assim como realizar o pré-tratamento dos sinais gerados pelas mesmas.

Na figura 3.1 está apresentado o diagrama em blocos de funcionamento das placas e seu interfaceamento.

##### 3.1.1 Placa Lógica

A placa lógica, ou placa de controle (figura 3.2), foi projetada utilizando-se o software Orcad *Release 9*, da Cadence Design System Inc, tendo como base os trabalhos apresentados por (MAIA, 2001), (ASSEF, 2006), (DORABIATO, 2007) e (GARCIA, 2008), sendo confeccionada pelo laboratório de engenharia biomédica da UTFPR, com o objetivo de ser usada como *kit* de desenvolvimento para análise de sinais ultrassônicos e servir de interface com os demais dispositivos.

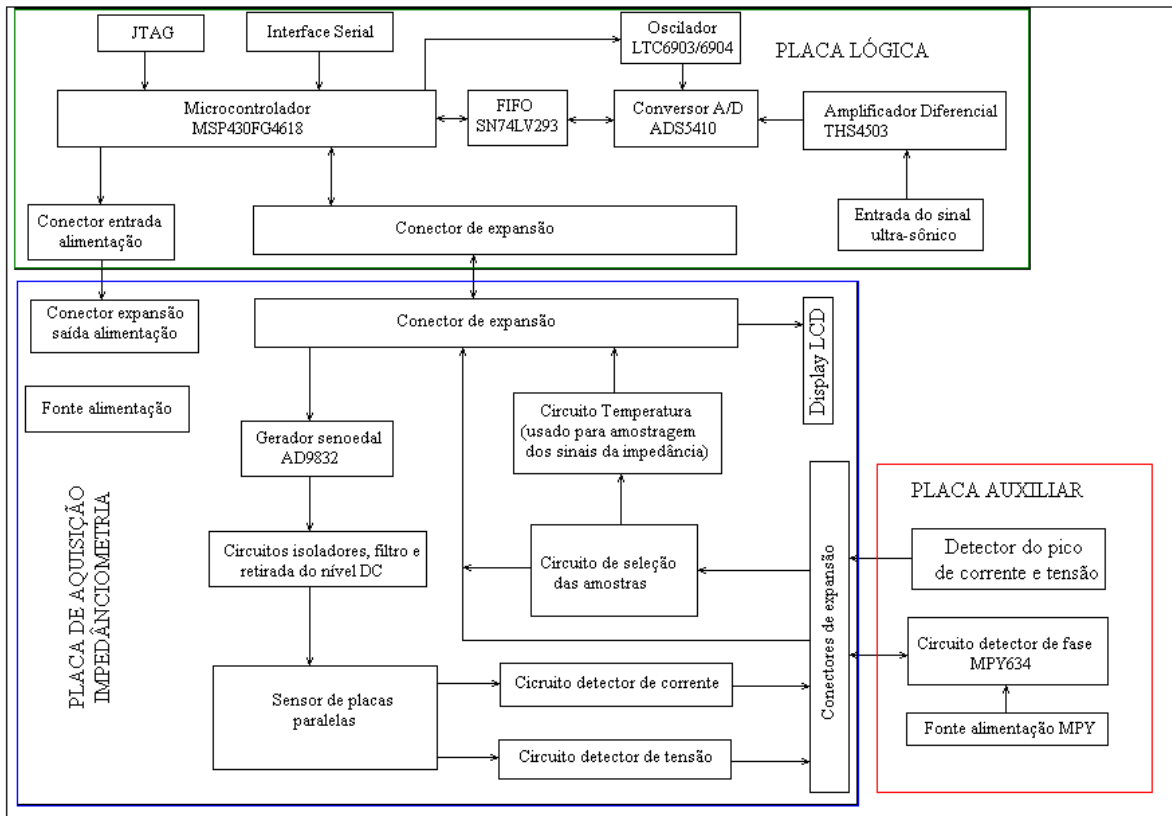


Figura 3.1 – Diagrama em blocos do hardware projetado.



Figura 3.2 – Placa lógica ou de controle.

No presente projeto esta placa é responsável pela execução do gerenciamento da memória FIFO (*First-In-First-Out*), realizar a interface homem máquina através de um display LCD (*Liquid Crystal Display*), controlar a frequência do conversor A/D (analógico/digital), realizar comunicação serial tipo UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*) e USB (*Universal Serial Bus*) para interface com um microcomputador e por fim gerenciar a placa de aquisição - impedanciometria.

O microcontrolador escolhido para a unidade lógica de controle e processamento foi o MSP430FG4618, da Texas Instruments, pois atende às especificações do projeto, tais como: faixa de frequência de operação, quantidade de memória de programa e de dados disponível, número de portas I/O (entrada / saída), conversor A/D interno, baixo consumo e fácil aquisição. A arquitetura MSP430, usada no microcontrolador, incorpora uma CPU (*Central Processing Unit*) RISC (*Reduced Instruction Set*) de 16 bits, periféricos, e um sistema de relógio flexível interligado a um barramento Von Neumann de endereços de memória comum (MAB, *memory address bus*) e um barramento de memória de dados (MDB, *memory data bus*), conforme pode ser evidenciado na figura 3.3.

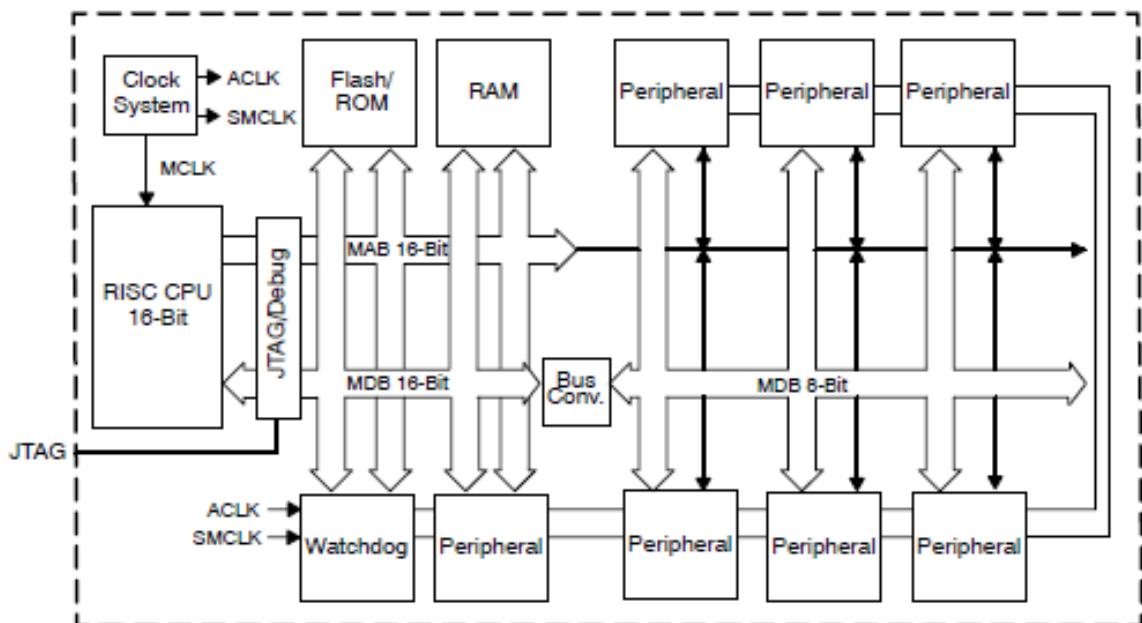


Figura 3.3 – Arquitetura do MSP430. Visualização do barramento da unidade central de processamento RISC, com os periféricos.

Fonte: Texas Instruments, 2009.



O MPS430FG4618 possui interface JTAG (*Joint Test Action Group*) para a programação e depuração do *firmware* desenvolvido para aplicação e está projetado para operar com frequência de 7,99 MHz de barramento interno originado do sinal de um cristal externo de 32.768 Hz.

Embora não seja usado no presente projeto, a placa lógica possui saída para controle de display gráfico, gerenciado pelo próprio microcontrolador e um transceiver de 3,3 V para 5 V (circuito integrado SN74LVC4245A). Na seqüência será realizada a descrição dos principais circuitos disponíveis na placa lógica.

### 3.1.1.1 Circuito serial tipo UART e USB

O circuito serial UART foi projeto utilizando o CI (circuito integrado) SN75LV4737A (U15) e a interface USB 2.0 através do CI TUSB3410 (U10), ambos fabricados pela Texas Instruments. As ligações de ambos os componentes seguiram as instruções prevista em suas documentações técnicas. As figuras 3.4 e 3.5 mostram o esquemático dos circuitos de interfaceamento UART e USB, respectivamente.

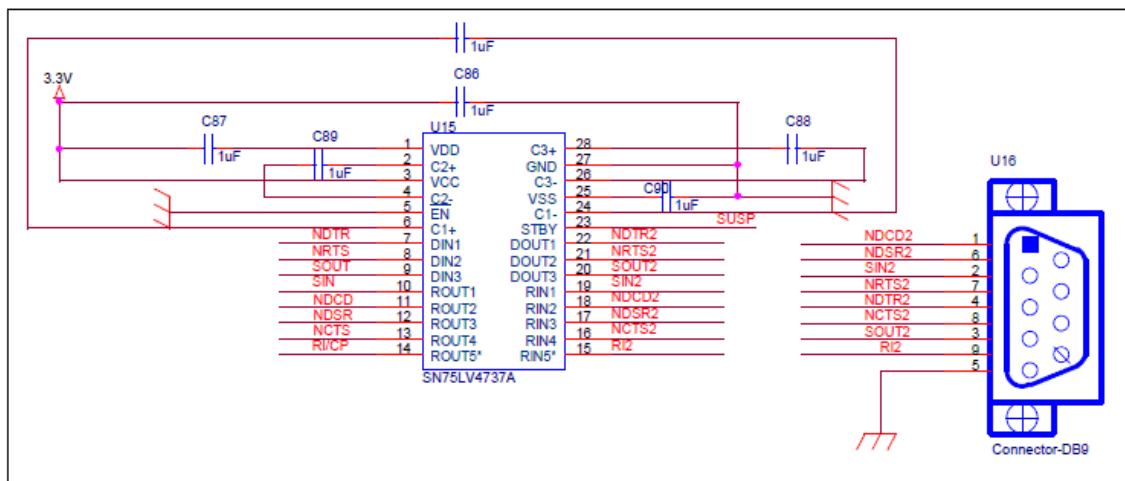


Figura 3.4 – Circuito de interface serial tipo UART.

As interfaces seriais foram utilizadas no presente trabalho de pesquisa somente como forma auxiliar de depuração do *hardware* e *firmware*, não sendo necessário o uso da mesma para o correto funcionamento do sistema.

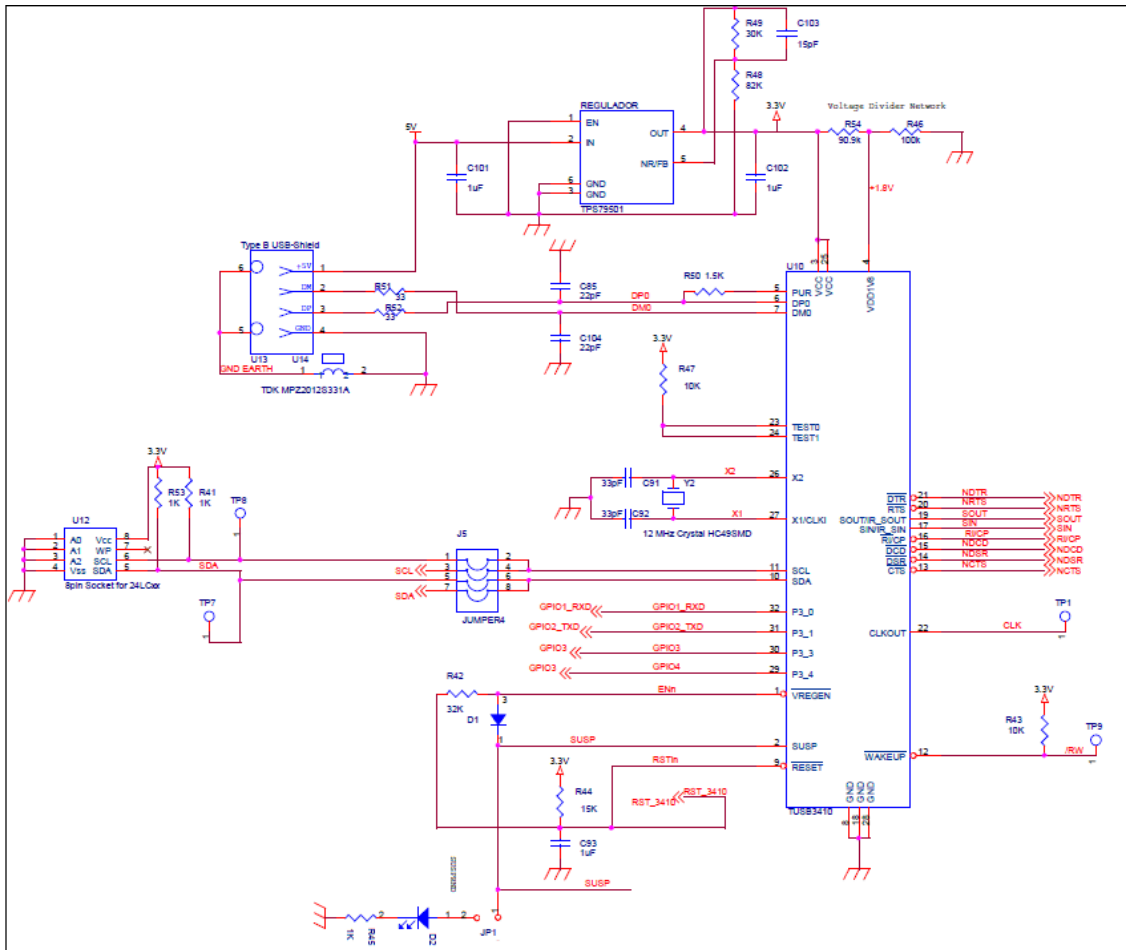


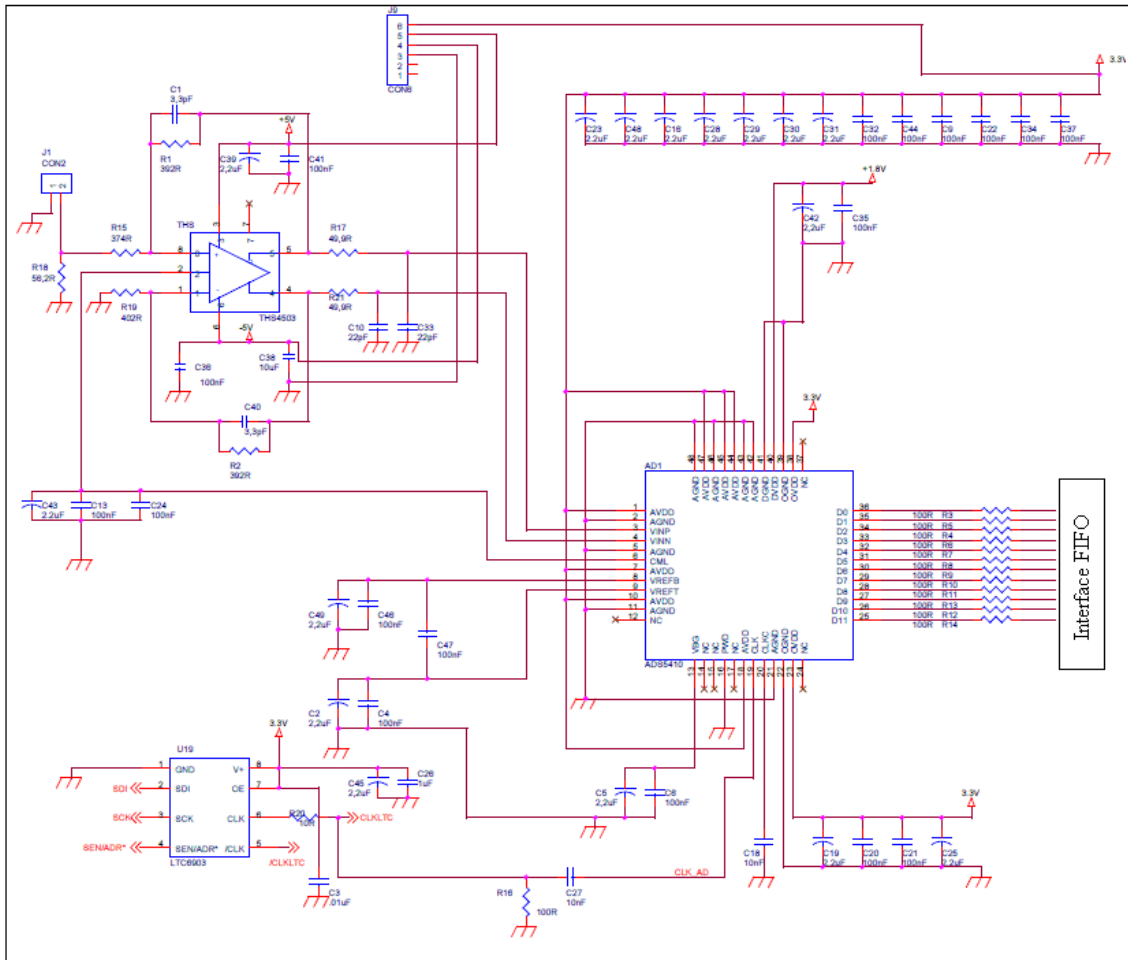
Figura 3.5 – Circuito serial tipo USB. Utiliza-se o CI TUSB3410 como interface entre os sinais TTL e a interface USB.

Fonte: Adaptado de Dorabiatto (2007).

### 3.1.1.2 Circuito de aquisição – Ultrassom

O sinal ultrassônico, conectado em JP1 (figura 3.6), antes de ser processado pelo microcontrolador, deverá ser digitalizado através do CI AD5410 (AD1), para em seguida ser armazenado na memória FIFO SN74V293.

O circuito de conexão entre o amplificador diferencial THS4503 (THS) e o conversor A/D AD5410 foi desenvolvido com base no esquemático do *kit* didático ADS5410EVM, disponibilizado pela Texas Instruments. O conversor A/D AD5410 possui resolução de 12 bits, taxa de amostragem de 80 milhões de amostras por segundo, arquitetura interna tipo *pipeline* de alto desempenho, largura de banda de 1 GHz e entrada diferencial do sinal de aquisição, fazendo-se necessária a utilização



**Figura 3.6 – Circuito de aquisição ultrassônico. O CI ADS5410 responsável por efetuar a digitalização do sinal, com a frequência de amostragem definida pela saída de *clock* do CI LTC6903/6904 e o sinal fornecido pela saída do diferenciador THS4503.**

**Fonte:** Adaptado de Texas Instruments (2010).

do circuito integrado THS4503 como diferenciador do sinal ultrassônico. O CI THS4503 opera em largura de banda de 370 MHz e possui taxa de inclinação de 2800 V/ $\mu$ s, tensão de alimentação balanceada entre +5 V e -5 V e entrada para tensão de referência de modo comum. A taxa de amostragem no conversor A/D, controlada pelo pino CLK\_AD, está ligada ao gerador de onda quadrada CI LTC6903/6904 (U19), podendo operar entre as frequências de 5 MHz a 68 MHz, sendo a taxa mínima de frequência limitada pelo conversor A/D e a máxima pelo gerador de onda quadrada. O LTC6903/6904 pode ser programado através de interface serial tipo I2C (*Inter-Integrated Circuit*), caso utilizado o LTC6904 e SPI (*Serial Peripheral Interface*) no caso do LTC6903, ambas controladas pelos pinos SDI e SCK, do microcontrolador, diferenciando seu controle apenas na hora da

compilação do código, já que ambos os *firmwares* de controle foram implementados e os CI's são compatíveis pino a pino.

O conversor analógico/digital ADS5410, assim como os demais circuitos da parte de aquisição, tiveram sua alimentação fornecida pela placa de aquisição – impedanciometria (conector J9), ficando a parte de controle interno digital do conversor A/D que opera com alimentação de +1,8 V, devido a imprevistos na implementação, obtida através de circuito externo composto pelo regulador LM317, resistores de ajuste da tensão de saída e capacitores de acoplamento.

### 3.1.1.3 Circuito de memória auxiliar

Após condicionamento e digitalização do sinal ultrassônico, as leituras do conversor A/D são armazenadas em memória FIFO SN74V293 (FIFO1), cujas ligações estão apresentadas na figura 3.7. O armazenamento das aquisições do sinal ultrassônico em memória auxiliar faz-se necessário, pois o conversor A/D, conforme já descrito no item anterior, poderá realizar aquisições em até 68 MHz e o microcontrolador MSP430FG4618, que deverá realizar o tratamento, opera em frequência inferior, não sendo assim capaz de realizar o tratamento da saída do conversor A/D em tempo real, fazendo-se necessário o uso da memória externa para o pré-armazenamento do sinal.

A FIFO SN74V293 é uma memória síncrona com 65.536 endereços de 18 bits, que suporta frequências de *clock* de até 166 MHz, com tempo de acesso para leitura e escrita de 6 ns. Todas as transferências de dados entre a memória FIFO e o microcontrolador são realizadas na transição do nível baixo para alto do pino RCLK (*read clock*) e pelo nível lógico “0” do pino REN (*read enable*). O pino CLK\_AD é usado como sincronismo entre as amostragens do conversor A/D e a escrita de dados na memória FIFO, juntamente com o pino WEN (*write enable*). Essa memória síncrona possui um pino de habilitação de saída OE (*output enable*) conectado ao microcontrolador, assim como *flags* de uso fixo para sinalização de operação, EF/OR (*Empty Flag/Output Ready*), FF/IR (*Full Flag/Input Ready*) e HF (*flag half-full*) usados no controle de carga de dados na memória e dois *flags* programáveis, PAE (*Almost-Empty*) e PAF (*Almost-Full*) usados na verificação do nível de armazenamento da memória, todos também ligados aos pinos de I/O do CI MSP430FG4618. A edição das funcionalidades dos *flags* programáveis são configuradas após o *reset* da

memória através dos pinos LD (*load*), FSEL0 (*flag-select bit 0*) e FSEL1 (*flag-select bit 1*). No sistema o pino LD é conectado à tensão de +3,3 V.

A memória apresenta dois modos de operação: o modo FWFT (*first-word fall-through*) e o modo standard. No modo FWFT, a primeira palavra digital escrita na FIFO é transferida para as linhas de dados de saída, após três transições do sinal ADC\_CLK, já no modo standard a primeira palavra escrita somente aparecerá na saída após o preenchimento completo da memória.

Os pinos OW (*output width*) e IW (*input width*) são usados na configuração do modo de leitura e escrita dos dados respectivamente, sendo estes em 9 ou 18 bits. Os pinos PRM (*partial reset memory*) e MRS (*master reset memory*), em nível lógico baixo, efetuam respectivamente o reset parcial e geral da memória.

#### 3.1.1.4 Conectores de expansão e alimentação

A placa lógica possui dois conectores de interfaceamento, sendo os conectores J9 e J7 que se conectam respectivamente aos conectores COM1 e JP5 da placa de aquisição – impedanciometria. Os conectores J9 e COM1 servem para o envio das tensões de alimentação da placa de aquisição para a placa lógica e os conectores J7 e JP5, ou conectores de expansão, são usados no controle da placa de aquisição. Na figura 3.7 estão apresentadas as ligações nos conectores da placa de aquisição – impedanciometria.

Os pinos I/O ULTRA1 a I/O ULTRA4 do conector JP5, foram implementados para uso futuro no tratamento do sinal ultrassônico. O pino AMOSTRAS/Temperatura, está conectado ao pino P6.3 do MSP430FG4618 que possui a funcionalidade de conversão A/D. A princípio esse pino seria usado para a amostragem do sinal de temperatura, mas foi modificado para realizar amostragens dos sinais de medição da fase e módulo da impedância.

Ainda no conector JP5, os pinos SDATA, SCLK, FSYNC, PSEL0, PSEL1 e FSELECT, são usados no controle do gerador de onda senoidal AD9832. Os pinos SEL S0, SEL S1, SEL S2 e EM 4051, são usados na seleção das amostras a serem tratadas pelo conversor analógico digital do MSP430FG4618 e por fim os pinos D0 a D3, LCD, RS e BACK, são usado no controle do *display*.

O conector de alimentação, CON1, da placa de aquisição irá fornecer as tensões de 3,3 V, 5 V, -5 V e GND para a placa lógica através do conector JP9.

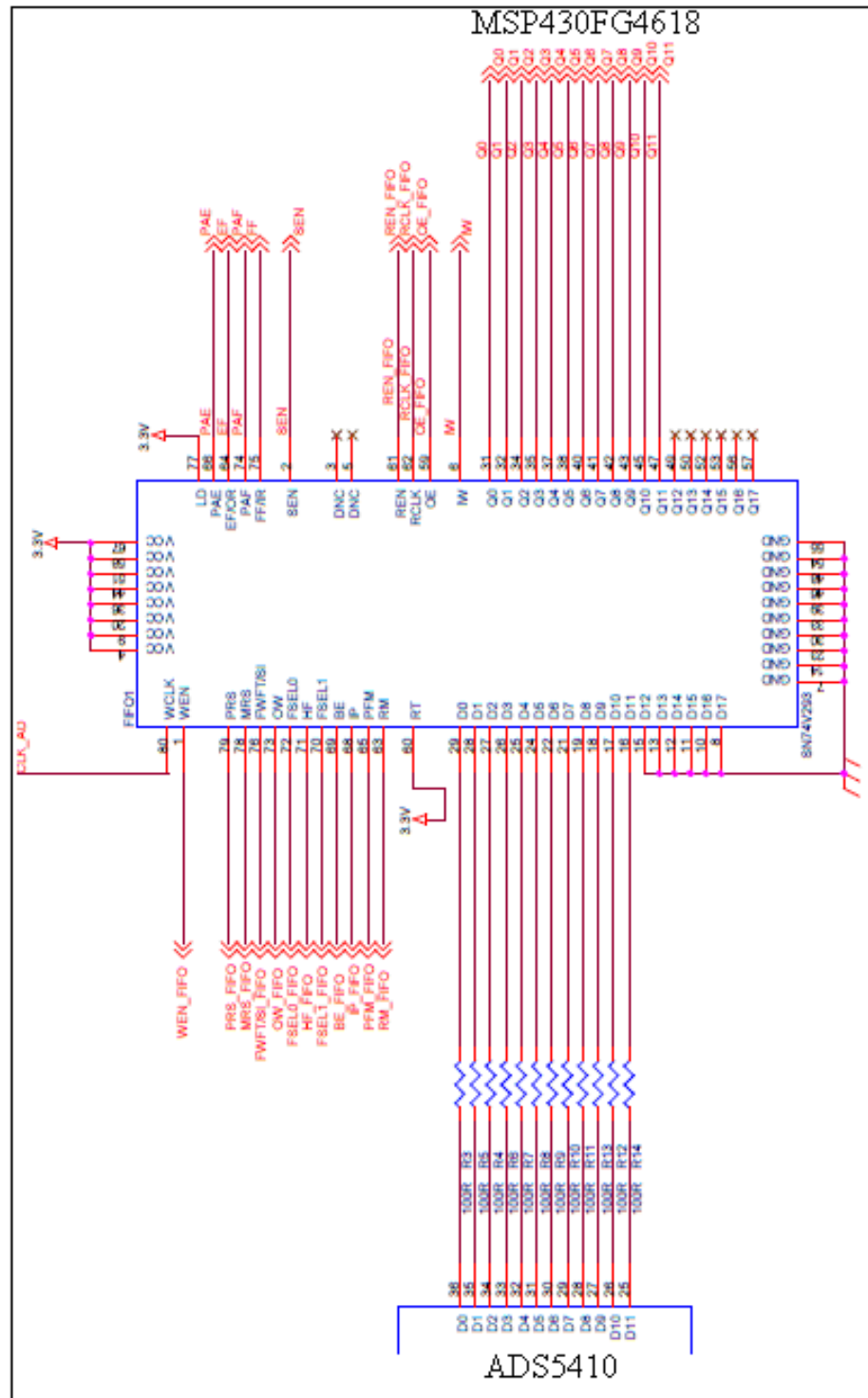
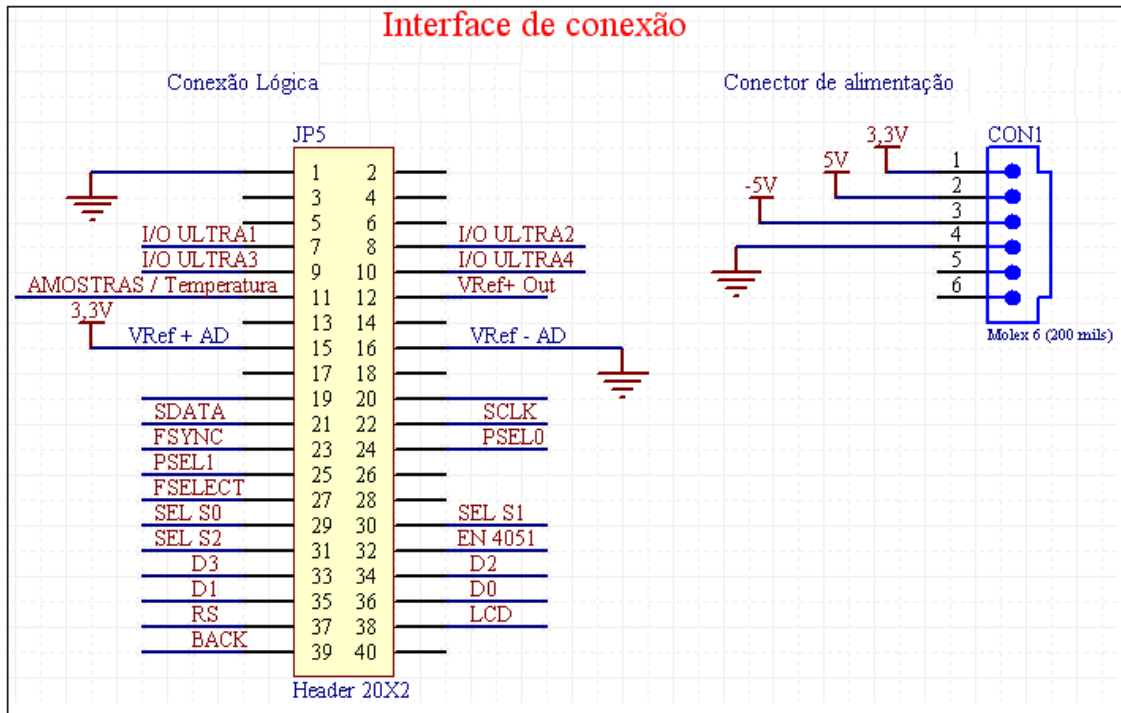


Figura 3.7 – Circuito de memória auxiliar: FIFO SN74V293. Memória conectada aos pinos do microcontrolador CI MSP430FG4618 para o armazenamento dos sinais gerados pelo conversor A/D CI ADS5410, para pós-processamento do microcontrolador.

Fonte: Adaptado de Assef (2006, p. 52).



**Figura 3.8 – Conectores de expansão da placa de aquisição – impedanciometria. Conexões lógicas e de alimentação entre as placas de aquisição – impedanciometria e a placa lógica ou de controle.**

### 3.1.2 Placa de aquisição - impedanciometria e placa auxiliar

A placa de aquisição – impedanciometria foi implementada utilizando-se o software Design Explorer Versão 7.2.85, da Altium Limited, com o objetivo de auxiliar no controle da geração do sinal de excitação do sensor de placas paralelas assim como realizar o pré-tratamento dos sinais gerados pelas mesmas. No início do projeto não se buscava grande precisão no tratamento dos sinais gerados pelos sensores de placas paralelas e imaginava-se que o tratamento fosse realizado compartilhado com o sistema de aquisição ultrassônico, através do conversor A/D AD5410 (AD1), mas no decorrer do projeto elaborou-se uma placa, chamada de placa auxiliar, que se incumbiu de aumentar a precisão do sistema de tratamento da fase da impedância do sensor de placas paralelas, assim como amostrar o pico de tensão e corrente.

Na figura 3.9 é visualizado a placa de aquisição – impedanciometria conectada a placa auxiliar (montada em placa universal).

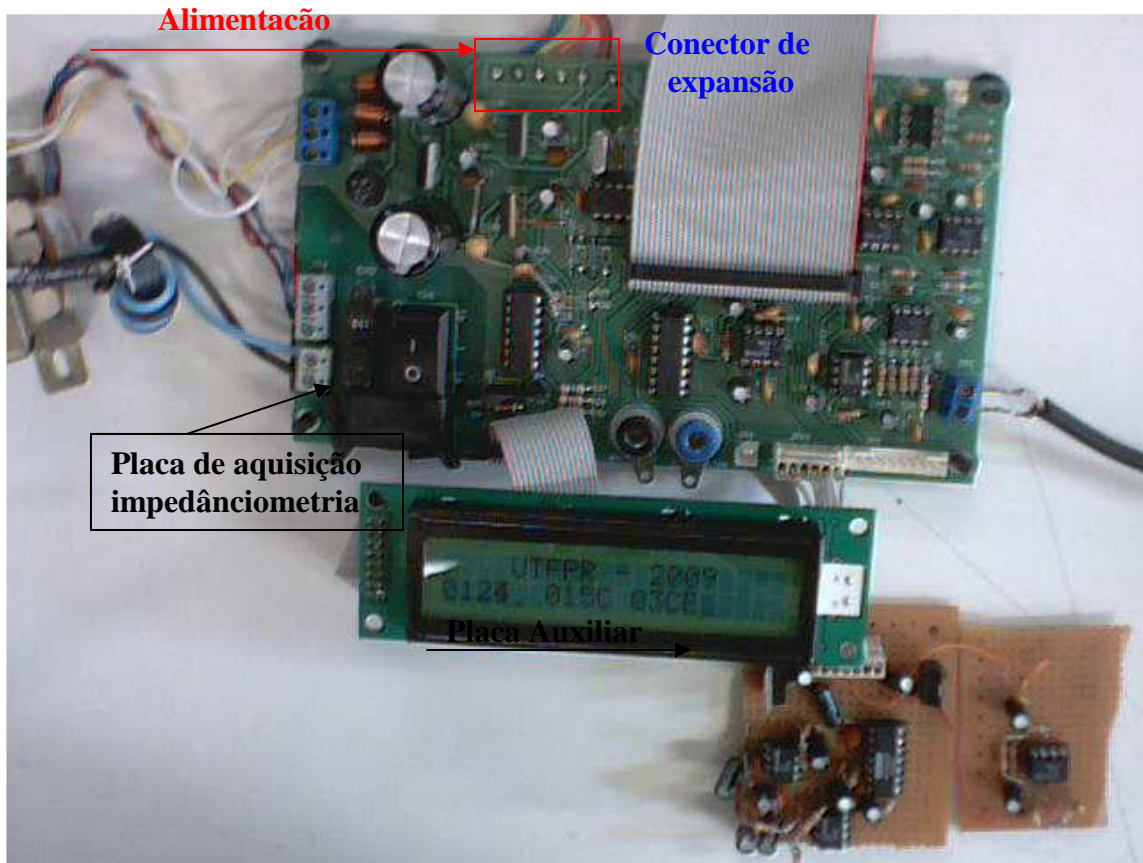


Figura 3.9 – Placa de aquisição – impedânciometria conectada à placa auxiliar.

Na seqüência serão descritos os principais circuitos utilizados no tratamento de aquisição da impedância.

### 3.1.2.1 Circuito gerador senoidal

O DDS (*Direct Digital Synthesis*) modelo AD9832 (U2) da Analog Devices, também utilizado como geradores de frequência em circuitos eletrocirúrgicos (BERNARDI, 2007), é o responsável pela geração do sinal senoidal de frequência de 1 MHz, para as placas paralelas. Esse circuito, de fase e frequência programável, gera a partir de uma tabela senoidal internamente gravada, sinais de frequência de até 25 MHz. A saída do gerador é realizado através de um conversor D/A (digital/analógico) do tipo fonte de corrente, necessitando assim, um resistor externo de  $330 \Omega$  como carga para gerar o sinal de tensão. Na figura 3.10 está apresentado o diagrama funcional do CI AD9832.



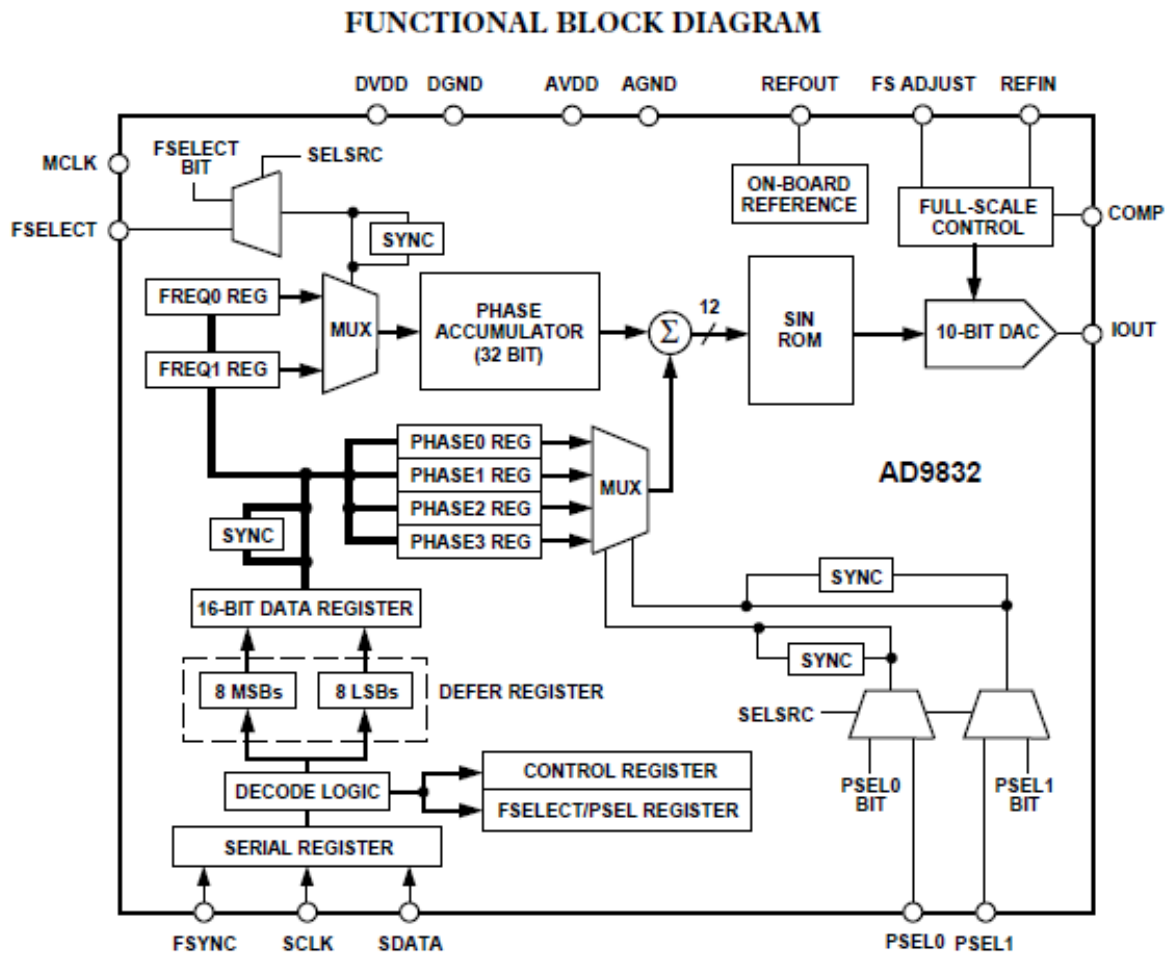


Figura 3.10 – Diagrama funcional do DDS AD9832.

Fonte: Analog Devices (1999).

A interface de controle da frequência e fase do oscilador AD9832 poderá se dar através da interface SPI, pinos SCLK, SDATA e FSYNC, ou pelos pinos auxiliares, PSEL0, PSEL1 e FSELECT. Como sinal de referência para o CI AD9832, foi desenvolvido o circuito oscilador de frequência de 24 MHz conforme pode ser visualizado na figura 3.11.

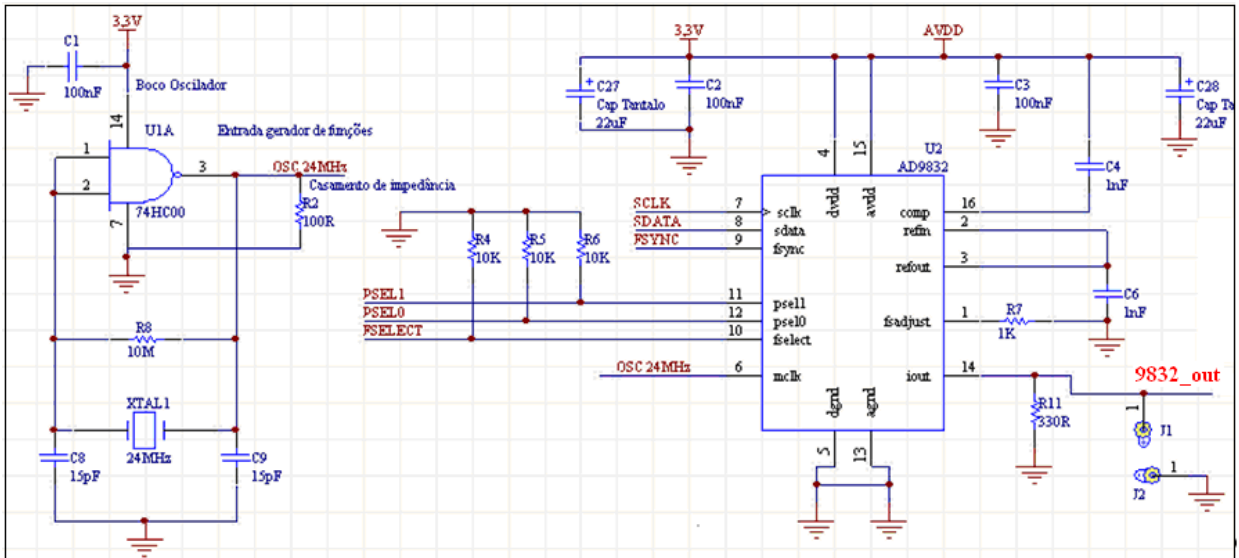


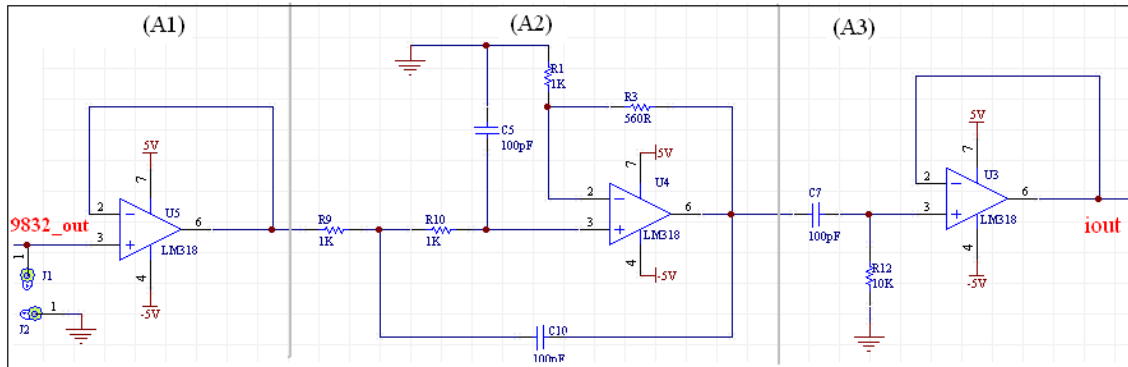
Figura 3.11 – Circuito gerador senoidal DDS AD9832, com o sinal de referência de 24MHz.

Fonte: Adaptado de Analog Devices (1999).

Em paralelo com a saída do gerador de senoidal foi implementado o conector (J1), para possibilitar a entrada de sinal através de equipamento externo. A princípio essa ligação seria utilizada somente como ferramental de testes até se conseguir um novo componente para substituição, pois o que se estava utilizando nos testes preliminares acabou se danificando e devido a demora na reposição do componente os testes foram realizados somente utilizando o gerador de funções Tektronix AFG3021, para a frequência de 1 MHz e amplitude próxima a 1,6 V, tensão e frequência próxima as programadas no CI AD9832.

### 3.1.2.2 Buffer e filtro passa-faixa

A figura 3.12 mostra o esquemático do circuito implementado para isolar a saída do CI AD9832 e filtrar o sinal do gerador senoidal, descrito no item anterior, de forma a eliminar o ruído do mesmo e retirar o nível DC da senóide de 1 MHz.



**Figura 3.12 – Buffer e filtro passa-faixa. Estágio (A1):circuito isolador. Estágios (A2) e (A3): filtro passa-faixa.**

No estágio (A1), mostrado na figura anterior, verifica-se o circuito isolador construído utilizando-se o amplificador operacional LM318 que opera na faixa de frequência de até 15 MHz. Nos estágios (A2) e (A3) se apresenta o circuito passa-faixa que está dividido em dois estágios, sendo o primeiro (A2) um filtro ativo passa-baixas de segunda ordem que se encarregará de tirar os harmônicos de alta frequência da senóide gerada pelo CI AD9832, operando com ganho de 1,5 V/V e frequência de corte de 1,592 KHz e o segundo estágio do filtro (A3), um filtro ativo passa-altas de primeira ordem operando com a frequência de corte de 159,155 Hz, que se encarregará de retirar o nível DC do sinal. No estágio (A3), está implementado na configuração *buffer* para que a carga, no caso o sensor de placas paralelas, não afetasse as características do filtro.

### 3.1.2.3 Circuito detector de tensão

O circuito detector de tensão foi implementado utilizando-se o operacional LM318 configurado para o ganho 2 V/V não inversor, conforme visualizado na figura 3.13. O sinal de saída desse circuito (AMOSTRA V), será utilizado, nos circuitos subseqüentes, como referência para se encontrar o pico da tensão e a defasagem da corrente em relação à tensão.

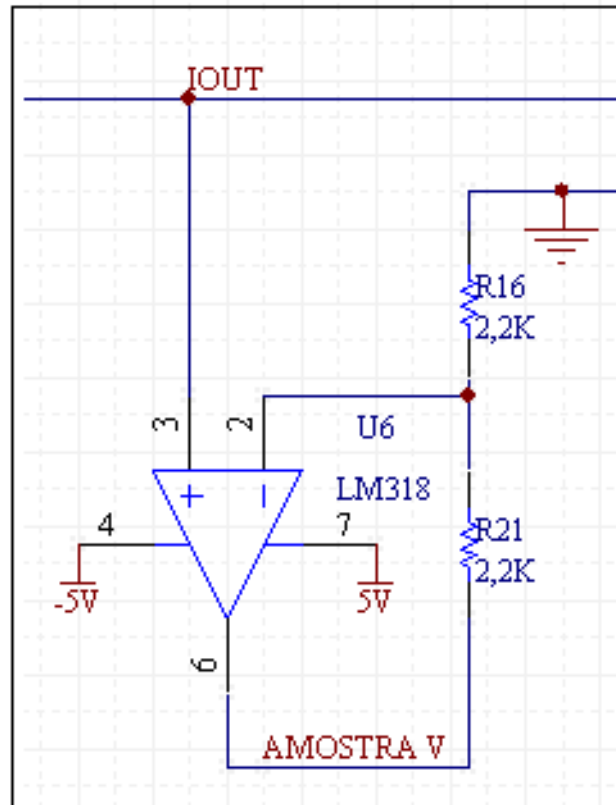


Figura 3.13 – Circuito detector de tensão.

#### 3.1.2.4 Circuito detector de corrente

Na figura 3.14 está apresentado o circuito desenvolvido para a amostragem da corrente, assim como a conexão para o sensor de placas paralelas, representado pelo conector JP1.

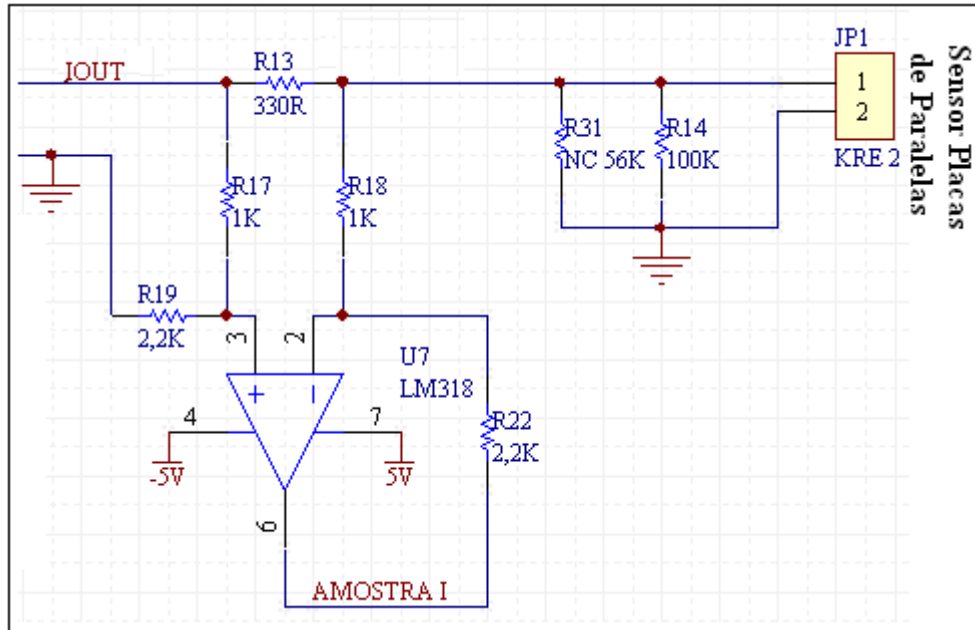


Figura 3.14 – Circuito detector de corrente e conexão do sensor de impedância.

No circuito apresentado, além de amostrar o valor da corrente, também se deu ganho ao sinal. O ganho está definido a partir dos valores obtidos na amostragem do sinal do sensor de placas paralelas, para o solo seco (menor leitura do sinal) e para o solo extremamente úmido (maior leitura do sinal), ficando escolhido o ganho em aproximadamente menos dois ( $- 2,2 \text{ V/V}$ ), pois dessa forma minimizou-se a influência de ruído no circuito por estar trabalhando com tensões um pouco mais elevadas e não ultrapassou o valor máximo permitido para a leitura através do conversor A/D do microcontrolador. O sinal de saída desse circuito (AMOSTRA I), será utilizado, nos circuitos subseqüentes, como referência para se encontrar o pico da corrente e a defasagem em relação a tensão.

### 3.1.2.5 Amostragem de temperatura

O circuito ponte mostrado na figura 3.15 está desenvolvido para aplicações futuras visando a detecção da temperatura do solo. O circuito em questão não foi implementado devido ao uso da saída da temperatura para a aquisição das amostras (vide item, amostragem da defasagem), já que tal saída, visualizada como AMOSTRAS/Temperatura no esquemático abaixo, está ligada à placa lógica através do pino de A/D do microcontrolador e passou a ser usada para amostragem dos sinais adquiridos no sensor de placas paralelas.

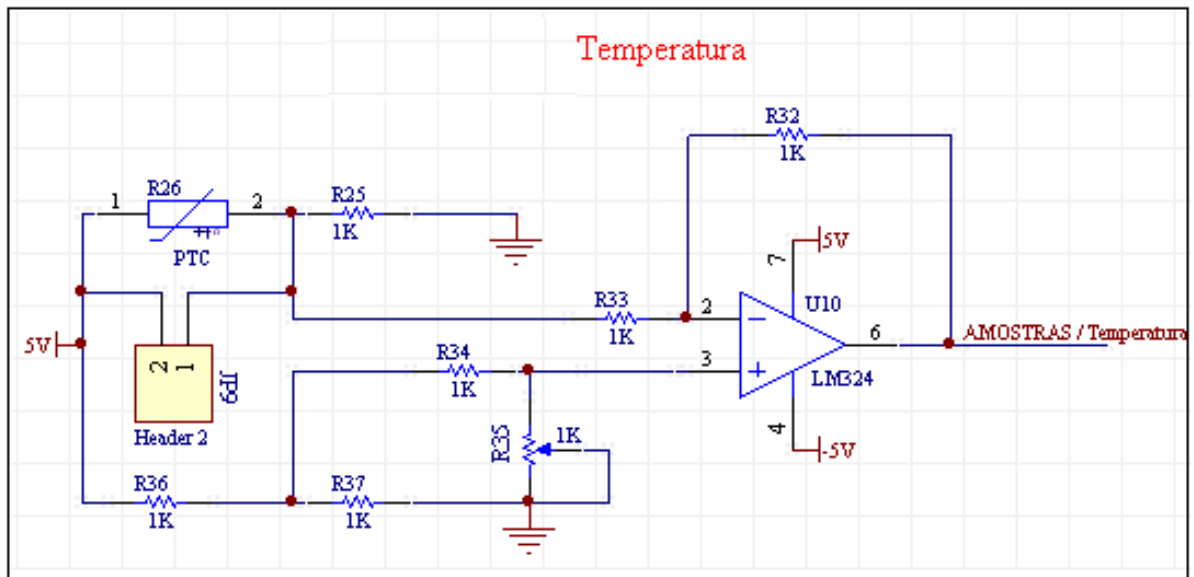


Figura 3.15 – Circuito detector de temperatura.

Para a medição da temperatura das amostras se fez uso do termômetro digital 10Ptherm 42, da IOPE – Instrumentos de Precisão LTDA, que possui faixa de operação entre  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , com sonda do tipo J (ferro/cobre-níquel).

### 3.1.2.6 Amostragem do pico de tensão e de corrente.

A amostragem do pico de tensão e corrente foram necessários para a visualização da variação dos mesmos em função dos tipos de solo e consistência, assim como forma necessária de se encontrar o valor da fase, já que o CI MPY634, fornece o valor do cosseno da fase multiplicado pelas amplitudes do sinal de tensão e corrente, maiores detalhes podem ser visto no item amostragem da defasagem.

O circuito de amostragem de pico faz parte da placa auxiliar, confeccionada em placa universal para a aquisição dos picos das amplitudes através amplificador operacional LM318 em configuração não inversora com retificação do ciclo negativo da tensão. Para baixas frequências o ganho do circuito detector do pico de corrente e tensão possuem ganho de  $1,5\text{ V/V}$ , mas para altas frequências (1 MHz) fez-se necessário o levantamento da curva de ganho do amplificador, já que verificou-se a não linearidade no sinal de saída com o aumento do valor de entrada. A figura 3.16 apresenta o gráfico da relação entre o pico do sinal da amostra em relação a saída

do amplificador, assim como é apresentado a equação 3.1, com correlação  $R=0,99941$ , a relação entre a entrada com a saída .

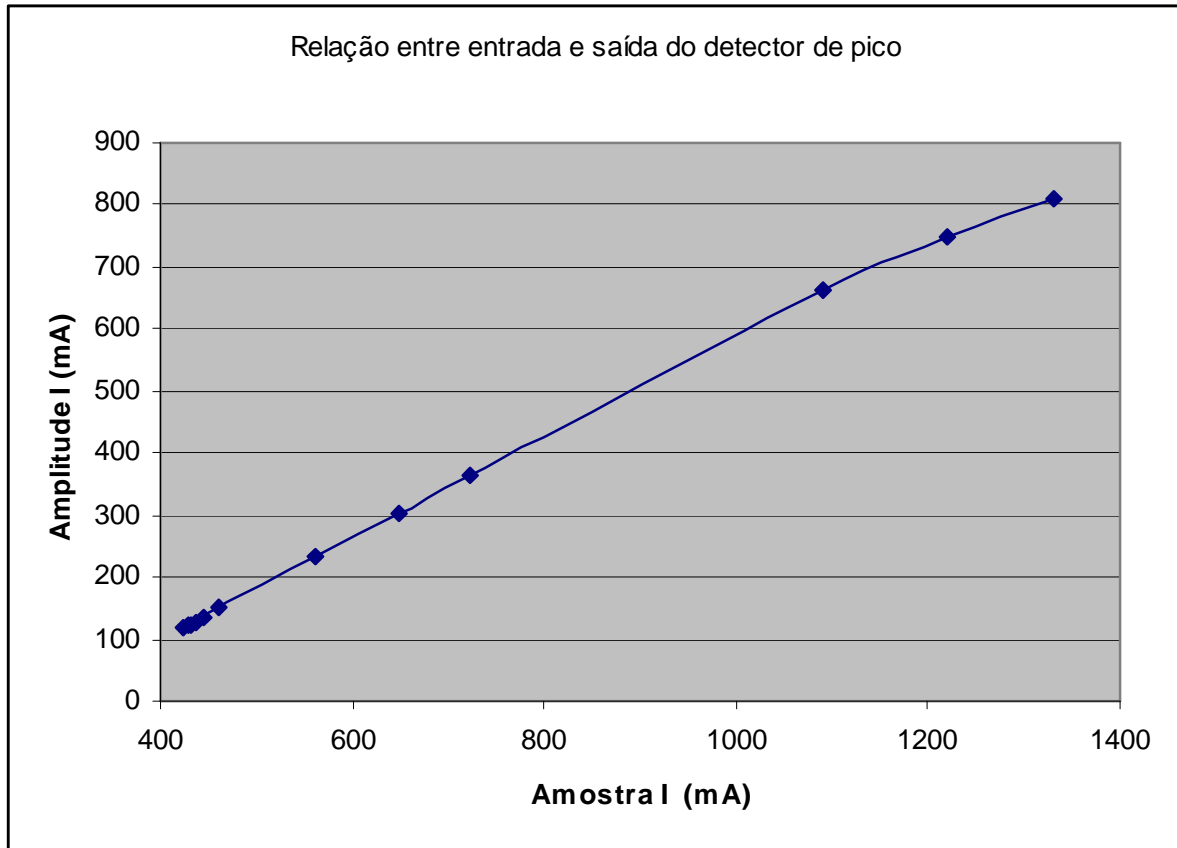


Figura 3.16 – Relação entre o sinal de entrada e saída do detector de pico de corrente.

$$\text{Amostr}I = 297,37371 + 1,05888 * \text{Ampl}I + 2,4413e^{-4} * \text{Ampl}I^2 \quad (3.1)$$

Na seqüência foi desenvolvido um filtro passa-baixas, com freqüência de corte de 15,916 Hz, para retificação do sinal e obtenção do pico das amplitudes de tensão e corrente. A figura 3.17 mostra esquemático do circuito confeccionado em placa universal para a obtenção do pico das amplitudes de tensão e corrente.

### 3.1.2.7 Amostragem da defasagem

Desenvolvida em uma placa auxiliar, o circuito de amostragem da fase foi implementado através do CI MPY634, fabricado pela Texas Instruments, cujo circuito montado em placa universal está apresentado na figura 3.17. Juntamente com o circuito detector de fase se fez necessário desenvolver uma fonte de

alimentação específica para o circuito de forma a diminuir ruídos na alimentação e obter um sinal linear na saída, conforme visto na figura 3.18.

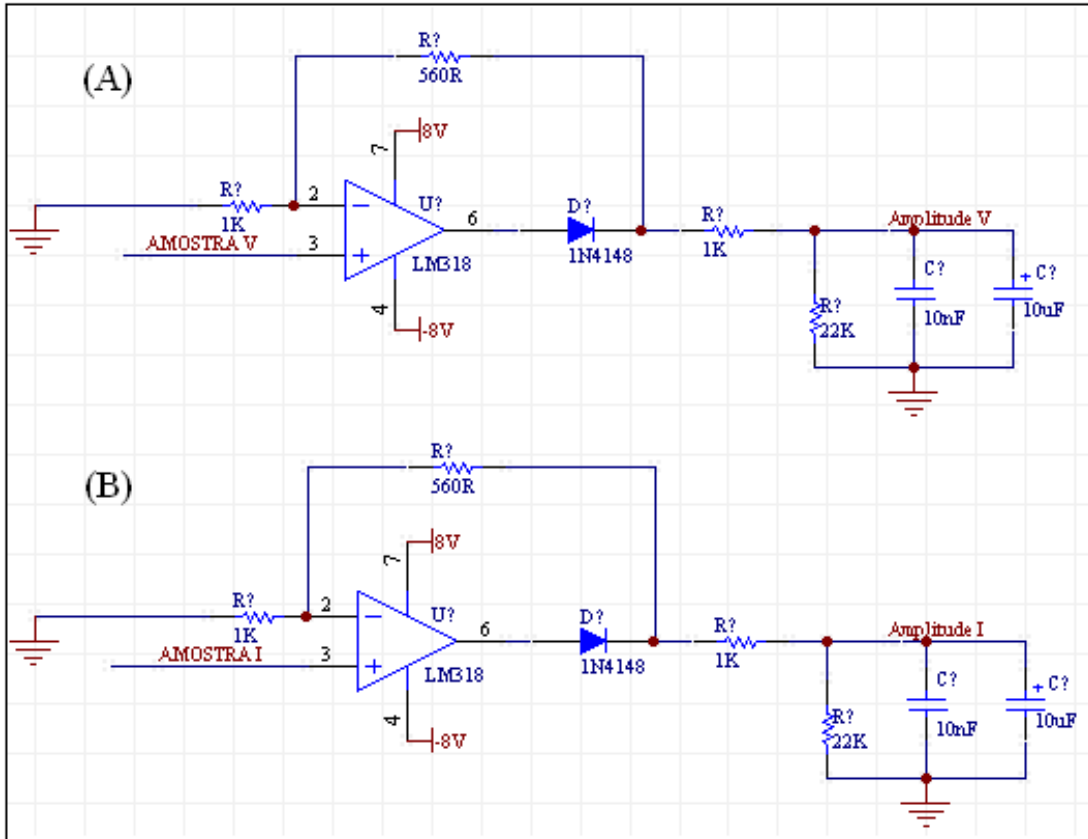


Figura 3.17 – Circuito detector do pico de tensão em corrente. Em (A) está apresentado o circuito detector do pico de tensão (Amplitude V) e em (B) o circuito da corrente (Amplitude I).

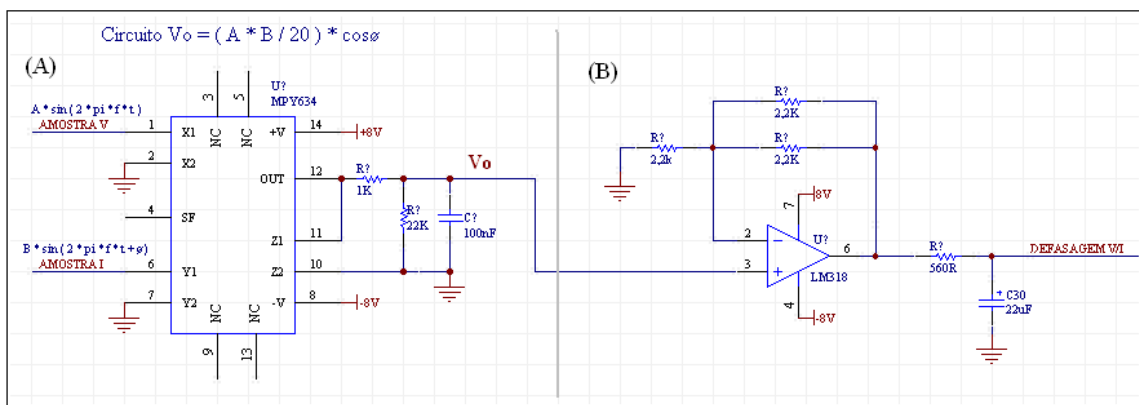


Figura 3.18 – Circuito detector de fase. Circuito sensível à amplitude de pico e à defasagem entre a Amostra V e Amostra I (CI MPY634), conectado ao amplificador operacional de ganho 1,5 V/V.



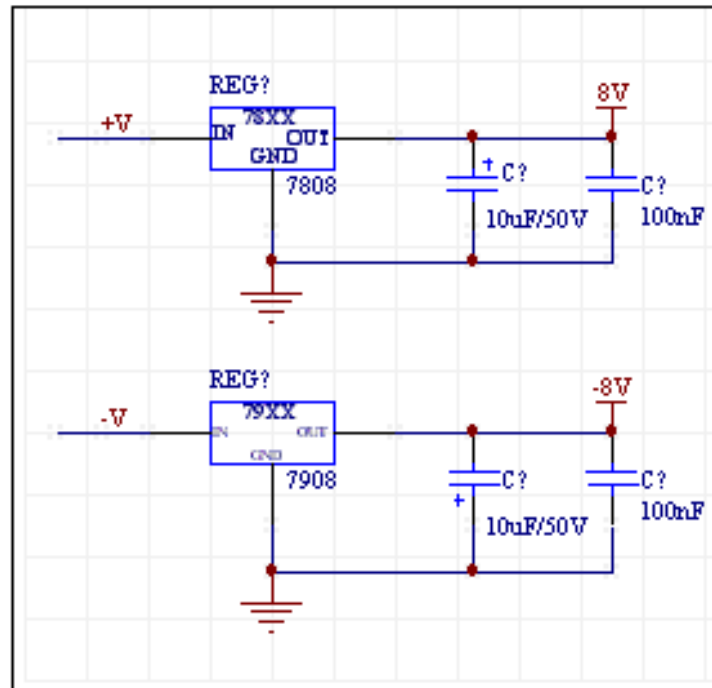


Figura 3.19 – Circuito de alimentação do detector de fase CI MPY634.

O MPY634 é um multiplicador analógico do tipo banda larga, de alta precisão, utilizado no presente estudo para se encontrar a defasagem entre a tensão e corrente. As ligações do componente estão implementadas conforme notas de aplicações fornecidas pelo fabricante. No sinal de saída (pino 12, OUT), o conjunto resistor capacitor filtrou o sinal de saída que na seqüência se conecta ao amplificador operacional LM318 para isolar o sinal de saída do MPY634 e dar o ganho não inversor de 1,5 vezes. Ainda, no tratamento do sinal de saída, está implementado logo após o operacional, um filtro passa-baixas de frequência de corte de 15,916 Hz, que serve para minimizar a oscilação do sinal.

Cálculo do sinal de saída do circuito MPY634:

$$V_o = (A * B / 20) * \cos \varphi \quad (3.2)$$

onde: “A” é a amplitude do pico da tensão (Amplitude V), “B” é a amplitude do pico da corrente (Amplitude I) e “ $\varphi$ ” é o ângulo de defasagem entre tensão e corrente.

### 3.1.2.8 Seleção das amostras

O multiplexador 74HC4051 (U8) é o responsável por chavear as diversas entradas de sinais analógicos para a saída de tratamento (figura 3.20). Como entradas têm-se os sinais das amostragens de tensão e corrente, o sinal da saída do circuito de amostragem da fase, as amplitudes de pico de corrente e tensão e por fim, a entrada de ultrassom a ser implementada no futuro. A seleção dessas amostras são controladas pelos pinos SEL S0, SEL S1 e SEL S2, conectados aos pinos da porta 2 do microcontrolador através do conector de expansão da placa de aquisição – impedanciometria com a placa lógica.

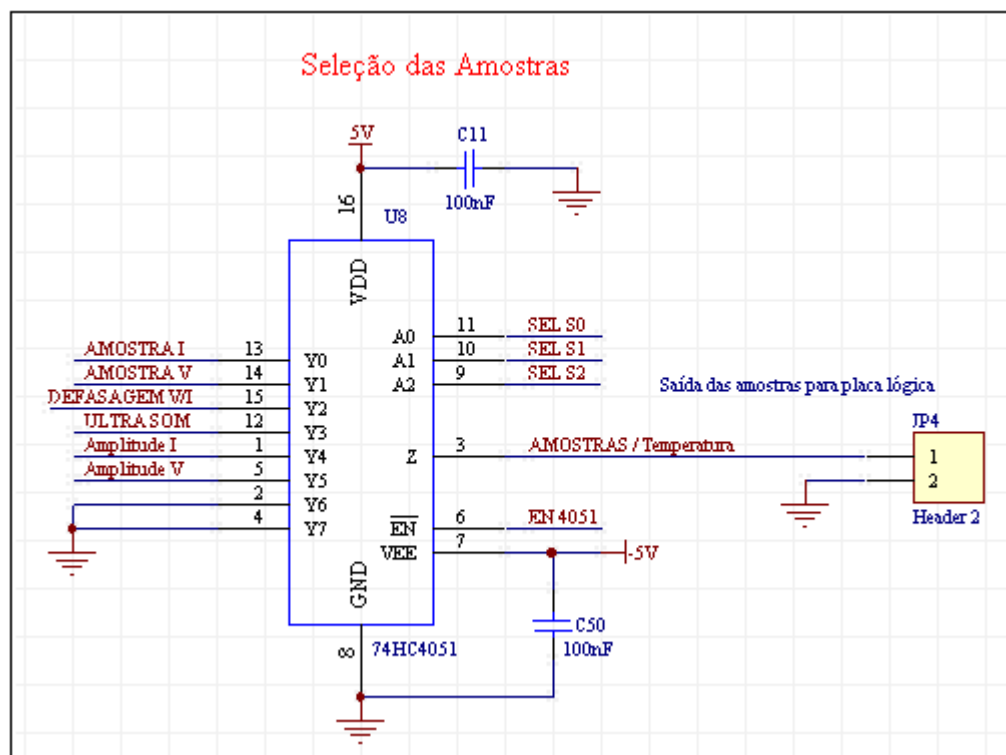


Figura 3.20 – Circuito multiplexador. Realiza a seleção das amostras a serem digitalizadas.

A saída das amostras, pino 3 do CI 74HC4051, estão ligadas ao conector JP4 e na saída do circuito de temperatura, pino AMOSTRAS/Temperatura, que por sua vez se conecta através do conector de expansão, ao pino de conversão analógica/digital do microcontrolador, para assim se realizar a digitalização e tratamento dos dados.

### 3.1.2.9 Circuito de alimentação e LCD

Com exceção do CI MPY634 e dos circuitos de detecção do pico de amplitude de corrente e tensão, os demais circuitos são alimentados pelo circuito apresentado na figura 3.21.

Para visualização dos resultados da aquisição da defasagem e dos picos de amplitude dos sinais de tensão e corrente, está implementado a interface através do *display* LCD de 2 linhas e 20 colunas, padrão *Hitachi* HD44780, conforme visualizado na figura 3.22.

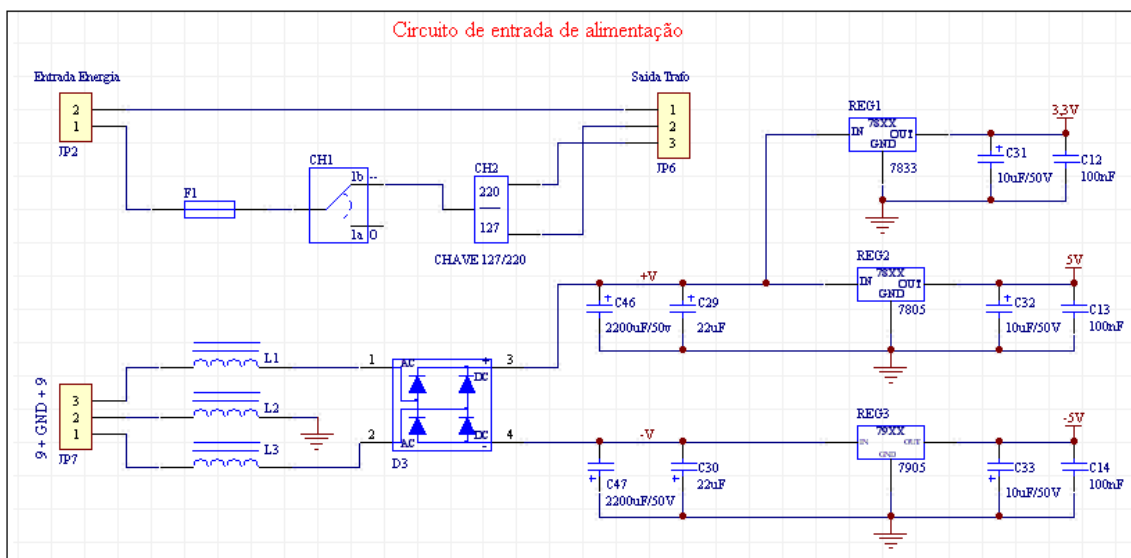


Figura 3.21 – Circuito principal de alimentação.

O controle do *display* é realizado pela porta 1 do microcontrolador MSP430FG4018, através do conector de expansão que liga a placa lógica à placa de aquisição – impedanciometria. Além dos pinos de controle de leitura e escrita do *display* também foi implementado o controle da iluminação do *display*, ou *backlight*, sinalizado na figura 3.22 pelo pino BACK, sendo controlado o seu acendimento pelo microcontrolador.

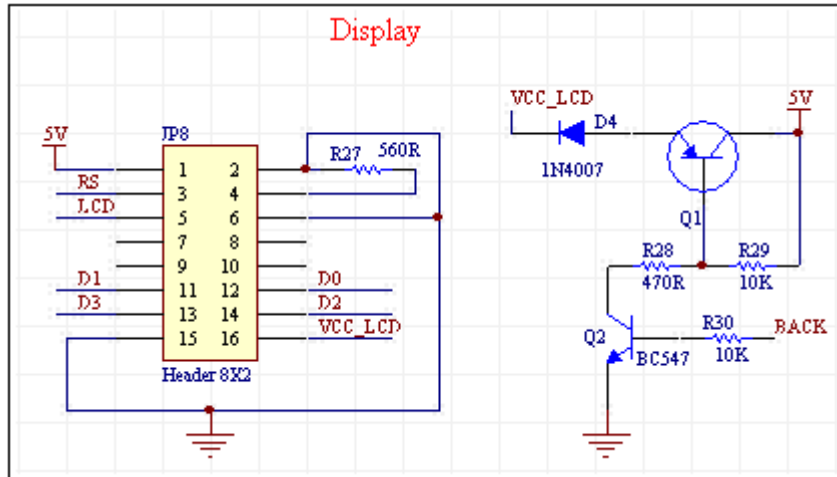


Figura 3.22 – Circuito de controle de escrita do *display* e do *backlight*.

### 3.2 FIRMWARE

O *firmware* de controle está desenvolvido na linguagem C utilizando a ferramenta de desenvolvimento IAR Embedded Workbench, versão 4.2, da IAR System, para o MSP430FG4018. O código desenvolvido é responsável pelo controle, gerenciando e execução das tarefas necessárias para o funcionamento dos circuitos periféricos, tais como, apresentação dos valores das medições de defasagem e amplitude da tensão e corrente, controle do *display* de cristal líquido, controle dos sistemas de recepção A/D, da memória FIFO, do gerador de frequência para aquisição do sinal de defasagem entre tensão e corrente, seleção das amostras para posterior aquisição e tratamento através do A/D interno, controle das interfaces seriais tipo UART e USB.

Na implementação do *firmware* desenvolveu-se uma máquina de estados principal, na qual os valores das leituras da defasagem da impedância e os valores do pico da tensão e corrente são mostrados automaticamente no *display*, sem necessidade de executar qualquer configuração. A figura 3.23 apresenta o fluxograma das principais funções desenvolvidas no programa.

Antes de se executar a inicialização dos periféricos primeiro é desabilitado o CI SN74LVC4245 que está conectado na mesma porta de controle do *display*, para assim evitar conflito entre os dois dispositivos.

Na inicialização dos periféricos, está primeiro configurado as portas de comunicação, para na seqüência desabilitar o gerador de *clock* do conversor A/D externo, o CI LTC6903, de modo a não gerar influência na geração do *clock* interno do microcontrolador. Depois de inicializadas as portas, configura-se o *clock* interno do MPS430FG4018 para trabalhar na frequência de 7,99 MHz com a base de tempo gerada através do cristal externo de 32.765 Hz e inicializado o timer A para executar interrupções a cada 0,9765 milissegundos.

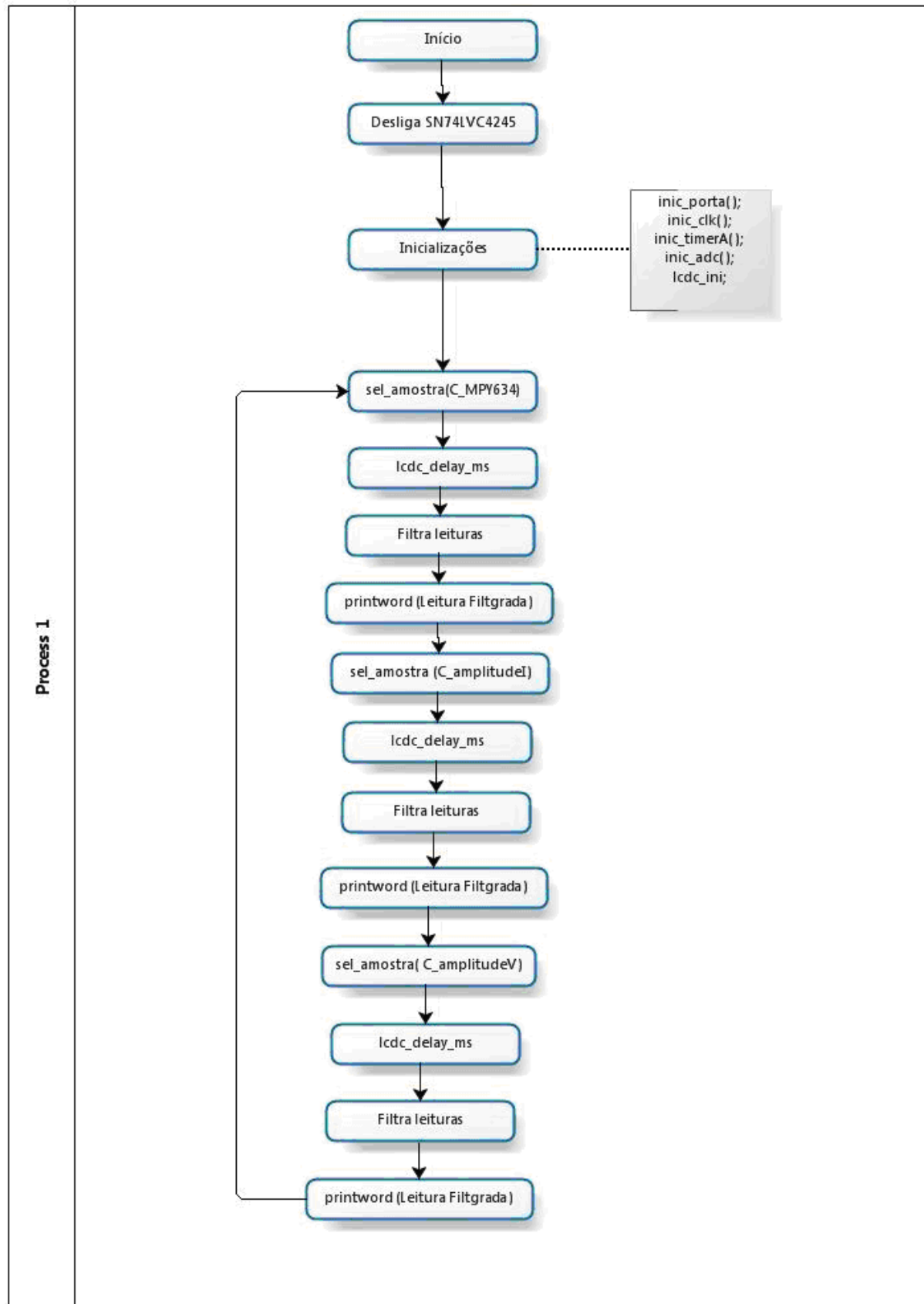


Figura 3.23 – Fluxograma do *firmware*.

O conversor analógico digital do MSP430FG4618 está configurado para capturar 32 amostras por segundo, utilizando-se da referência de tensão interna de 2,5 V para amostrar as leituras de pico de tensão e corrente assim como o valor da defasagem entre os sinais. Por fim, o *display* está inicializado para funcionar em 2 linhas e 20 colunas de forma a apresentar os valores das leituras do A/D na segunda linha do *display*. Na seqüência se apresenta a figura 3.24 com a disposição dos valores das amostras no *display*.

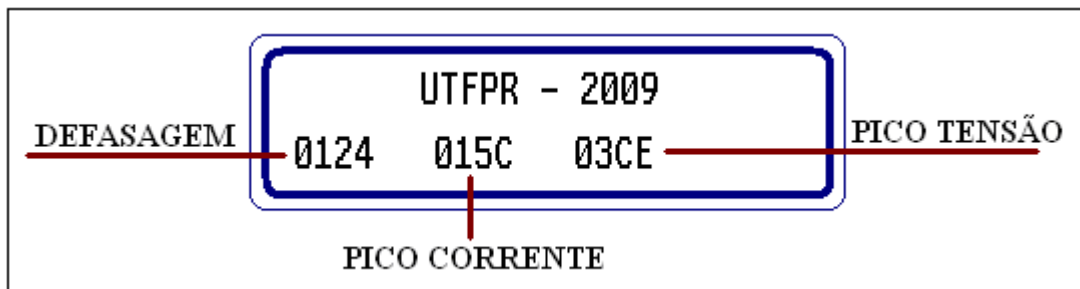


Figura 3.24 – Disposição dos valores das amostras no *display*.

Para a seleção das amostras utiliza-se a função “sel\_amostra()” que controla o CI multiplexador 74HC4051, em seguida a seleção da amostra, implementou-se tempo de espera (*delay*) para estabilização das leituras que em seguida realizou-se a média das últimas 20 amostras, descartando-se as 2 amostras de maior e menor valor para então apresentar o resultado no display através da função “printword()”.

O controle da memória FIFO, do gerador de freqüência CI LTC6903, das interfaces serial tipo UART e USB, embora desenvolvidas no código fonte do circuito, não foram apresentadas no presente fluxograma devido à utilização do A/D interno para a aquisição do sinal das placas paralelas e pelo fato das seriais serem utilizadas somente como forma de testes, não sendo necessárias para o funcionamento do sistema.

### 3.3 METODOLOGIA DE TESTE APLICADA

Esta descrição está dividida em duas partes, (1) destinada à descrição dos protocolos iniciais de testes de medição da impedância e da análise do sinal ultrassônico utilizando aparelhos comerciais, assim como fazendo uso de placas padrões desenvolvidas pelo laboratório de ultrassom da UTFPR, (2) descreve os

testes realizados após a confecção das placas lógicas e da placa de aquisição – impedanciometria, para aquisição dos sinais de impedância.

### 3.3.1 Protocolo experimental de medição da defasagem

Nos testes iniciais realizados para aquisição da defasagem entre tensão e corrente, buscou-se definir a melhor distância e dimensões das placas paralelas utilizadas para medição da defasagem, assim como o tamanho do cabo que estará ligado às placas paralelas até o circuito de medição, visando diminuir ruídos, atenuação do sinal e as capacitâncias e indutâncias parasitas geradas ao se injetar sinais de alta frequência no cabo (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2004) e por fim definir a melhor frequência de trabalho para a aquisição da defasagem de modo a viabilizar a confecção do *hardware* dedicado para a aplicação.

Para a medição da defasagem entre a tensão e corrente, propôs-se a utilização de sensores de placas paralelas, constituídas por fenolite com superfície de 0,15 mm de cobre em uma das faces e revestidas por verniz isolante para evitar a corrosão da mesma, possuindo largura de 50,4 mm, comprimento de 84,7 mm e espaçadas 24,2 mm uma da outra, conectadas a um cabo de bitola 0,75 mm<sup>2</sup> mais malha de terra com comprimento 65 cm, sendo a malha ligada ao sinal de excitação e o cabo interno para leitura do sinal recebido, conforme visto na figura 3.25. Foram analisadas outras disposições e tamanhos das placas de fenolite para a melhoria da aquisição da defasagem, não sendo constatadas melhorias relevantes quando relacionadas às dimensões citadas anteriormente.

Para medição da umidade relativa nas amostras, inseriu-se o sensor em um *becker* de 700 ml, contendo 600 g de terra previamente seca por cerca de 2 horas a uma temperatura de 110 °C, de forma a obter o solo com umidade relativa extremamente baixa, e em seguida passada por peneira de 2 mm para retirada de grandes materiais sólidos, como pedras, de forma a manter o meio interno entre as placas o mais semelhante possível para realização das análises sem que a terra acarretasse influência expressiva na medição em função de variações na sua consistência.



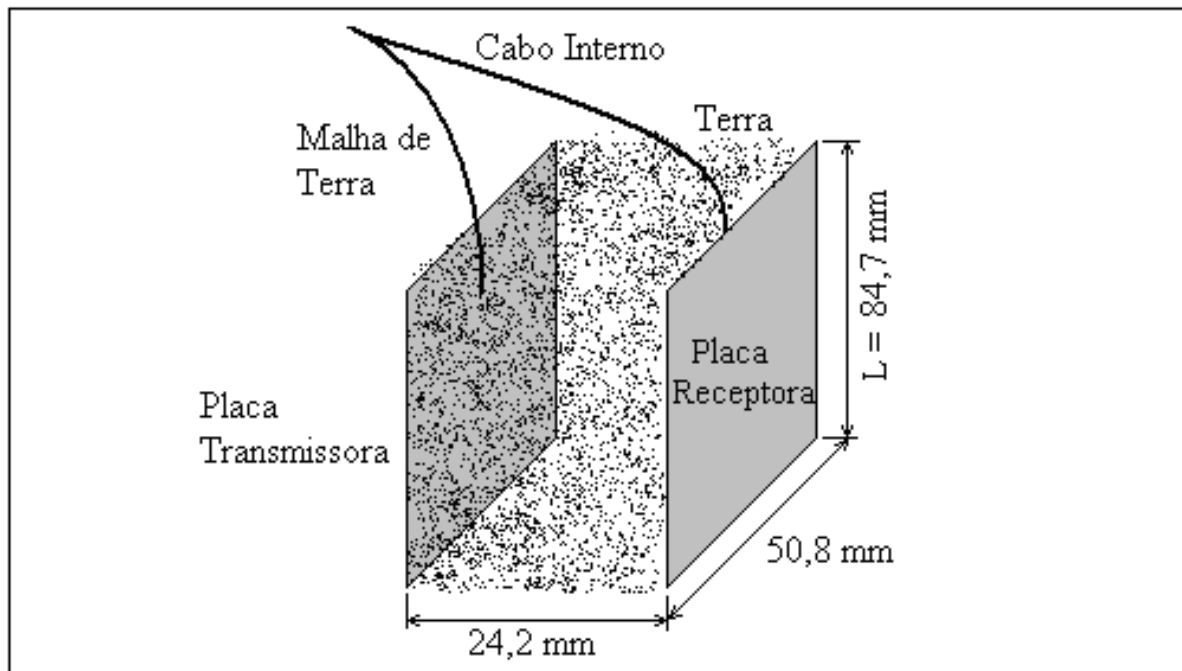


Figura 3.25 – Sensor de placas paralelas para análise da impedância.

Para a aquisição dos valores de impedância utilizou-se o equipamento Agilent 4294A, que trabalha entre as frequências de 40 Hz e 110 MHz, sendo aplicado um sinal de aproximadamente 500 mV. Devido à grande influência da indutância dos cabos nas frequências superiores a 25 MHz, principalmente para comprimentos de cabo superiores a 4 metros, limitou-se a análise da varredura até a frequência de 10 MHz, realizando assim a escolha do melhor valor de frequência para a leitura da impedância na faixa de 1 MHz e limitou-se o comprimento do cabo para 65 cm.

O *becker*, contendo o sensor e a terra, foi colocado sobre uma balança, com resolução mínima de 0,1 g, para a análise das mudanças de fase e módulo da impedância em função da adição de água no recipiente, até que o mesmo atingisse 215 g de água, valor esse em que a água preenchia todo o recipiente, de forma a obter uma leitura para condição extremamente úmida. Na realização das medições da impedância em função da variação da umidade no recipiente, esperou-se cinco minutos entre cada adição de água, para absorção da mesma na terra, sendo inserido 1 g de água para valores relativos até 30 g, 2 g para até 40 g e em torno de 10 g para as demais medições. Em seguida, foram coletados os dados da variação da impedância através do analisador Agilent, gravando 801 pontos do gráfico gerado para frequências de 40 Hz a 10 MHz, para posterior análise em um microcomputador.

Foram observadas as curvas características da variação da fase da impedância em função da variação da frequência para diversos níveis de umidade, para fins de encontrar a melhor frequência de tratamento, analisando também, em cinco amostras, a variação da fase na frequência de 1 MHz, assim como a relação da variação entre fase e módulo em função da adição de água.

### 3.3.2 Protocolo experimental de medição do sinal ultrassônico

Os testes preliminares de medição do sinal ultrassônico incumbiram-se em definir a melhor frequência de operação do ultrassom, realizar testes com diversos modelos de ultrassom para verificar a atenuação do sinal quando em contato com o solo, assim como definir o melhor modo de trabalho, pulso-eco ou transmissão-recepção, e a distância entre os sensores, caso utilizado o último modo trabalho citado.

Assim como no protocolo inicial de testes de aquisição da defasagem entre a tensão e a corrente, inseriu-se terra entre os sensores ultrassônicos de transmissão e recepção, conforme visualizado na figura 3.26. O material foi preparado de forma semelhante à utilizada no método anterior, ficando a caracterização da alteração da amplitude do sinal recebido em função da quantidade de água na amostra. Mantiveram-se inalteradas a temperatura e pressão das amostras, evitando a influência das mesmas na medição, assim como evidenciadas no ar (JAKEVICIUS; DEMCENKO, 2008).

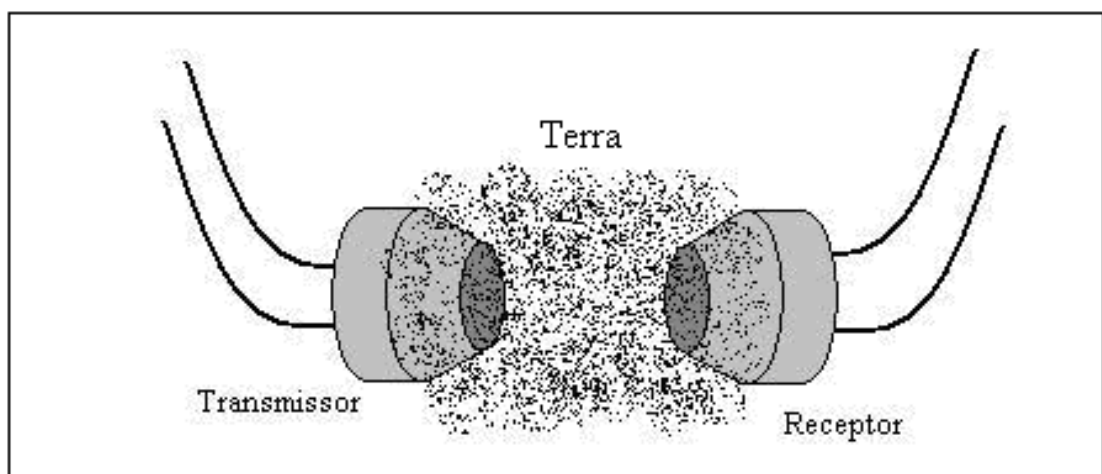
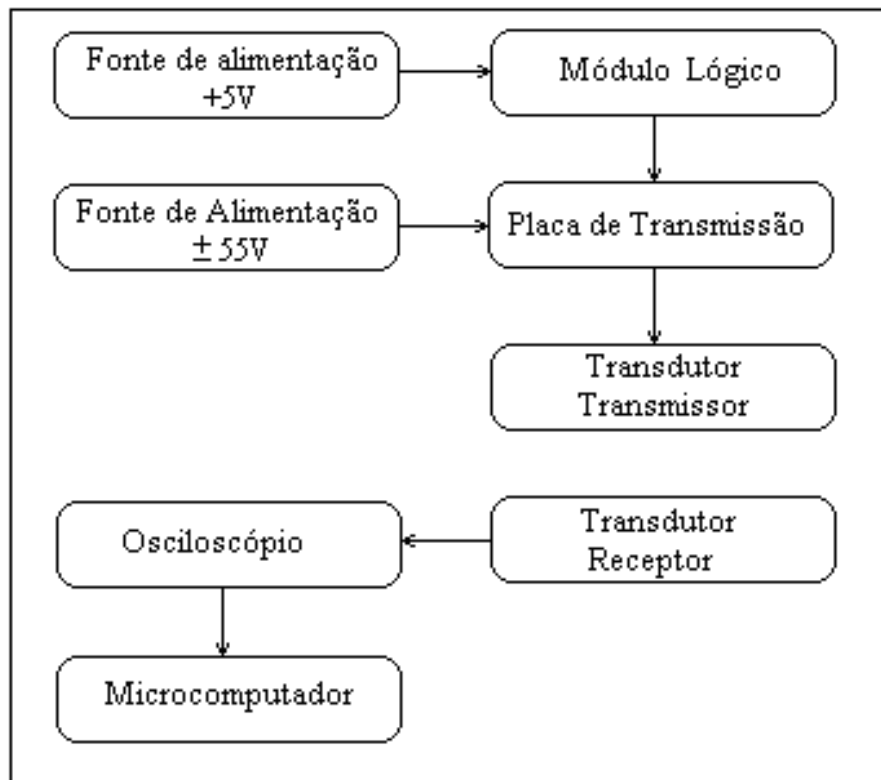


Figura 3.26 – Sensores ultrassônicos no modo transmissão-recepção.

Em testes iniciais se verificou a grande atenuação quando usado o método pulso-eco para a captura do sinal, adotando-se o método transmissão-recepção como padrão para análise. Os transdutores utilizados para os testes foram os sensores Murata MA40E7S e MS40E7R, para a transmissão e recepção, respectivamente, ambos com freqüência de ressonância de 40 kHz, banda estreita, limitados a 100 V pico a pico na excitação, ficando os sensores a uma distância de 17 mm um do outro.

O diagrama em blocos do circuito utilizado para a realização do experimento pode ser visualizado abaixo.



**Figura 3.27 – Diagrama do circuito de excitação e aquisição do sinal ultrassônico.**

As fontes externas de +5 V e  $\pm 55$  V foram utilizadas para a alimentação do módulo lógico e da placa de transmissão, respectivamente. O módulo lógico por sua vez é constituído por osciladores astáveis e monoastáveis que têm por objetivo regular a freqüência do sinal de excitação, taxa de repetição do sinal, número de ciclos aplicado no transdutor transmissor e o nível de sinal na saída da placa de transmissão. Além da regulagem da amplitude do sinal de saída, o módulo lógico conecta-se à placa de transmissão no envio do sinal de excitação do *driver* de

corrente, que por sua vez é constituída por chaves FET's (*Field Effect Transistor*) e por filtros para amenizar o ruído no momento da geração de pulsos quadrados para excitação do transdutor transmissor.

O sensor de recepção foi ligado diretamente a um osciloscópio (modelo TDS2022, Tektronix Inc.), para captar a onda ultrassônica que se propagou através do meio a ser caracterizado, utilizando-se a atenuação do sinal em comparação a um meio de referência, no caso o ar. O sinal digitalizado no osciloscópio foi transferido, via porta RS232, a um microcomputador para posterior processamento.

Para o estudo preliminar do sinal ultrassônico utilizou-se o modo transmissão recepção, para atravessar 4 mm de solo, com a taxa de repetição ajustada em 77 Hz, com a frequência de excitação centrada na ressonância dos transdutores de 40 kHz e com amplitude do sinal em 95 V pico a pico.

### 3.3.3 Protocolo final de medição da impedância

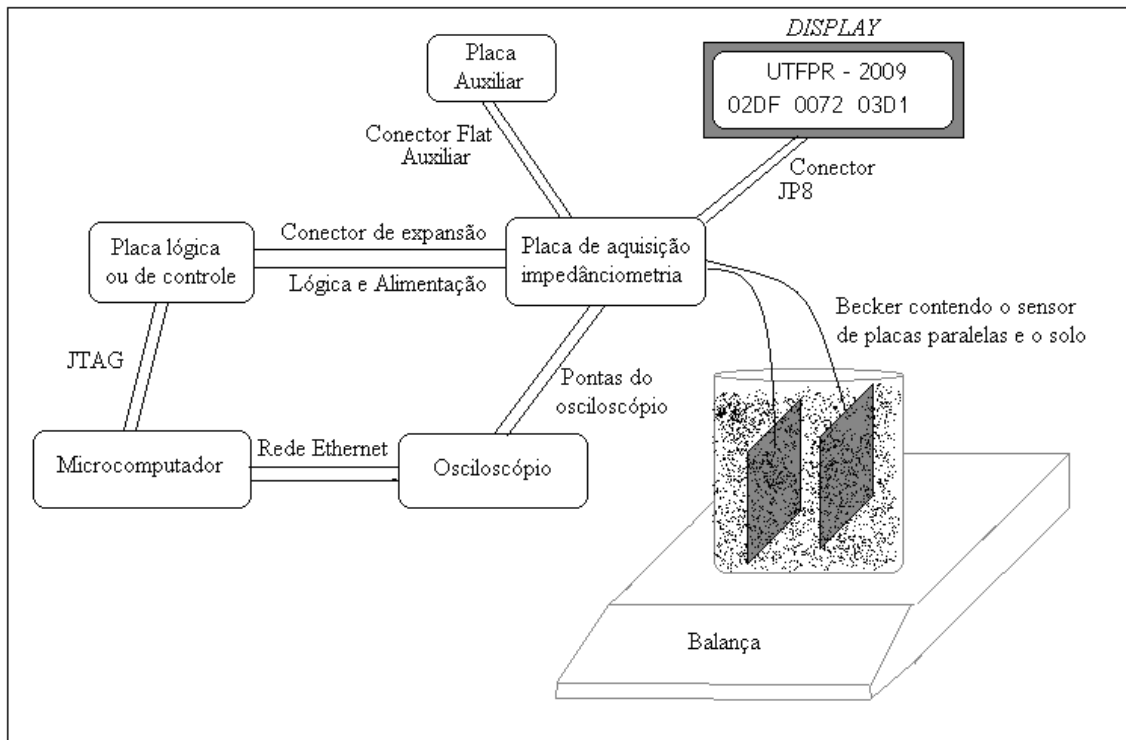
Com base no protocolo inicial de testes procurou-se minimizar os erros oriundos no processo de medição, assim como se buscou melhorar a precisão das medições. Para isso utilizou-se as placas lógica e de aquisição – impedanciometria, para a geração da excitação e aquisição das leituras do sinal de defasagem entre tensão e corrente.

Na figura 3.28 é apresentada um esboço da estrutura montada para a medição da variação da fase da impedância em função do acréscimo de água.

No processo de medição da defasagem utilizaram-se sensores de placas paralelas, com características semelhantes ao descrito no item '3.3.1', conectado a um cabo de bitola 0,75 mm mais malha de terra com comprimento reduzido para 38 cm e inserido o conjunto de sensores em um *becker* com capacidade de 250 ml.

O solo analisado foi retirado da região noroeste de Curitiba/Paraná, no bairro Santa Felicidade, localizado nas coordenadas geográficas 25° 22' 23,32" latitude sul e 49° 19' 12,13" longitude oeste de Greenwich (Google Maps, 2010), solo este usado em pastagem de animais de pequeno e médio porte e no plantio de árvores frutíferas, contendo grande quantidade de substrato orgânico e vegetal, com clima predominante, segundo a classificação de Köppen-Geiger, do tipo "Cfb" - clima temperado marítimo úmido (PEEL; FINLAYSON; McMAHON, 2007). No ANEXO A

está apresentada a análise do solo realizada pelo Departamento de Química e Biologia da UTFPR.



**Figura 3.28 – Esboço do processo de medição da impedância em função da adição de água. Visualiza-se cada dispositivo utilizado juntamente com suas interfaces de conexão.**

Para análise comparativa dos resultados obtidos pelo sistema de medição da variação da fase da impedância em relação ao teor de água adicionado, utilizou-se balança com resolução de 0,1 g que permite pesar nominalmente 2,0 kg, permitindo assim medir a quantidade de água adicionada a cada amostragem. O processo de secagem assim como a aparelhagem usada para a medição gravimétrica de umidade seguiu o descrito pela NBR 06457 (1986). A cada amostra foram inseridos, no *becker* com capacidade de 350 ml, 115,6 g de terra previamente passada por peneira de 2 mm e seca por 10 horas a uma temperatura de aproximadamente 110 °C de forma a obter a terra o mais uniforme possível e com umidade relativa bastante baixa. Na metodologia aplicada, define-se que todo solo após passar pelo processo de secagem possuirá o mesmo valor de umidade, sendo referenciado no presente estudo como solo seco.

Para cada amostra, coletaram-se dezesseis pontos diferentes de umidade relativa, sendo o tempo de espera para a amostragem da medição variada conforme

a quantidade de água adicionada, sendo inserido 1 g para valores relativos até 4 g, 2 g de água para até 12 g, 10 g para até 50 g, 20 g para até 90 g e por fim inserido 10 g, para a amostragem do valor máximo de 100 g, valor esse considerado o solo extremamente úmido. Os tempos de espera para a coleta dos valores de impedância mostradas no *display* ficaram em 5 minutos para inserções de 1 g, 8 minutos para 2 g, 12 minutos para inserções de 10 g de água e espera de 15 minutos para inserções de 20 g de água. Também foram realizados testes com tempos de espera diferenciados para efeito comparativo dos resultados.

As análises se deram normalmente em temperatura ambiente, em torno de 28 °C, sendo realizadas variações em duas amostragens, sendo: (1) aumentando-se a temperatura da amostra para aproximadamente 39 °C e (2) adicionando à amostra de solo 24 % de calcário dolomítico tipo D, usado normalmente na correção da acidez do solo (PÁDUA, 2006).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a metodologia proposta de medição das características de impedância e amplitude da onda ultrassônica em relação à variação da umidade, objetivou-se verificar a correlação entre várias medições, não buscando definir uma curva de calibração do sistema de forma a obter a medição direta da umidade, pois na metodologia aplicada não se garante que o teor de água adicionada no *becker* estará distribuída uniformemente na amostra de solo, limitando-se assim verificar a repetitividade entre as análises. Apresentam-se também os resultados obtidos em testes preliminares utilizados como parâmetros na definição do sistema projetado.

Com intuito de diminuir erros no processo de inserção e absorção da água pelo solo o *becker* de 700 ml, que continha 600 g de solo seco, utilizado em testes preliminares, teve sua capacidade reduzida para 350 ml com 115,6 g de solo seco.

Esse capítulo está dividido em duas partes: (1) resultados referentes à análise do sistema de aquisição da impedância, (2) análise do sistema ultrassônico.

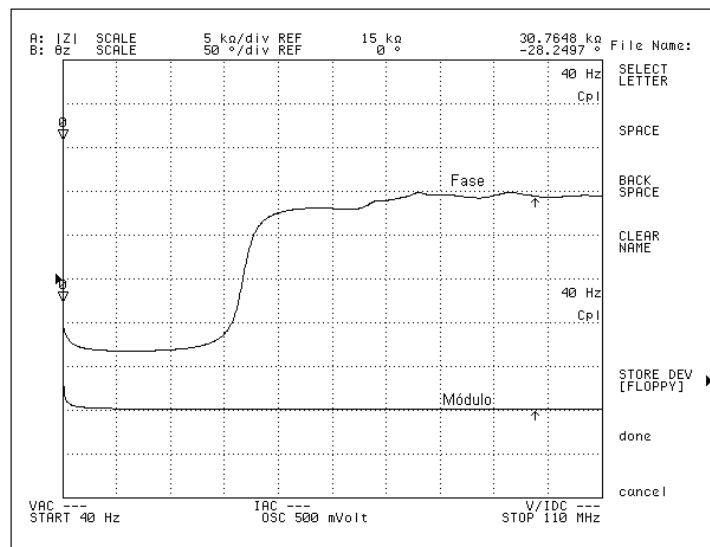
### 4.1.1 Resultados e discussões - método de medição de impedância

A figura 4.1 foi obtida pelo equipamento analisador de impedância agilent 4294a, no qual realizou-se medições após secagem do solo. Verifica-se uma brusca variação da fase para frequências acima de 25 MHz, isso devido às capacitâncias e indutâncias parasitas oriundas do cabo. Essa alteração foi bastante evidenciada conforme o aumento do tamanho do cabo e a disposição do mesmo sobre a bancada. Considerou-se de vital importância a realização desse teste inicial, pois não só ajudou na definição do comprimento do cabo, assim como auxiliou na definição da frequência a ser usada nos testes.

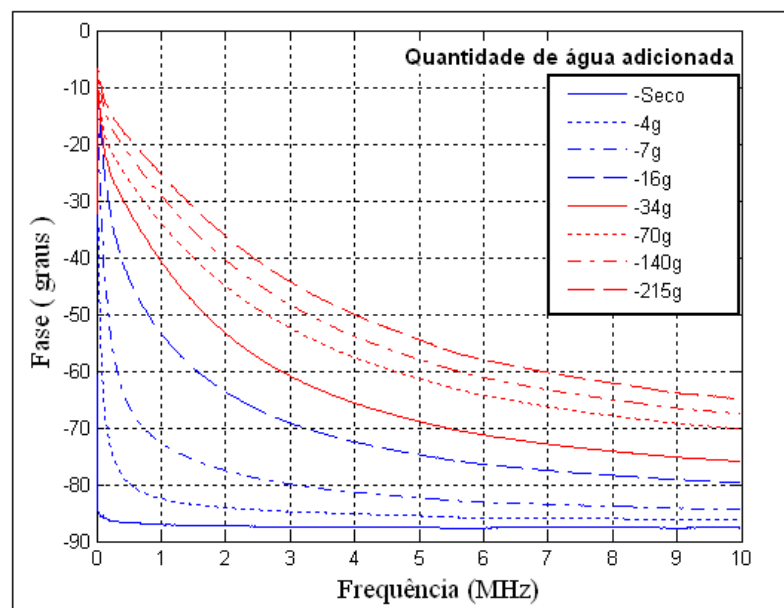
Foram realizados testes usando vários modelos de cabos, com e sem blindagem, com diferentes bitolas de fios, de forma a conseguir uma configuração que minimizasse a influência do mesmo sobre o sinal da fase da impedância.

A fim de se definir a melhor frequência de trabalho do sistema a ser implementado, realizou-se a análise preliminar da variação da fase em função da umidade. O gráfico da figura 4.2 foi obtido com o comprimento de 65 cm de cabo, e com a varredura da frequência entre 40 Hz a 10 MHz. A partir desse gráfico verificou-se que os sensores de placas paralelas geraram resultados expressivos da

variação de fase em função da quantidade de água, evidenciados principalmente nas baixas frequências, mas conforme estudos de Eller (1995), fazer-se uso de frequências muito baixas poderá fazer com que a textura do solo gere influência no valor da constante dielétrica, optando-se assim por trabalhar com a frequência de 1 MHz, por possuir grande variação na permissividade do meio e não ser tão suscetível à textura do solo.



**Figura 4.1 -Aquisição do módulo e fase da impedância para frequências entre 40 Hz a 110 MHz, evidenciando a influência na variação da fase do sistema de aquisição de placas paralelas para frequências superiores a 25 MHz.**

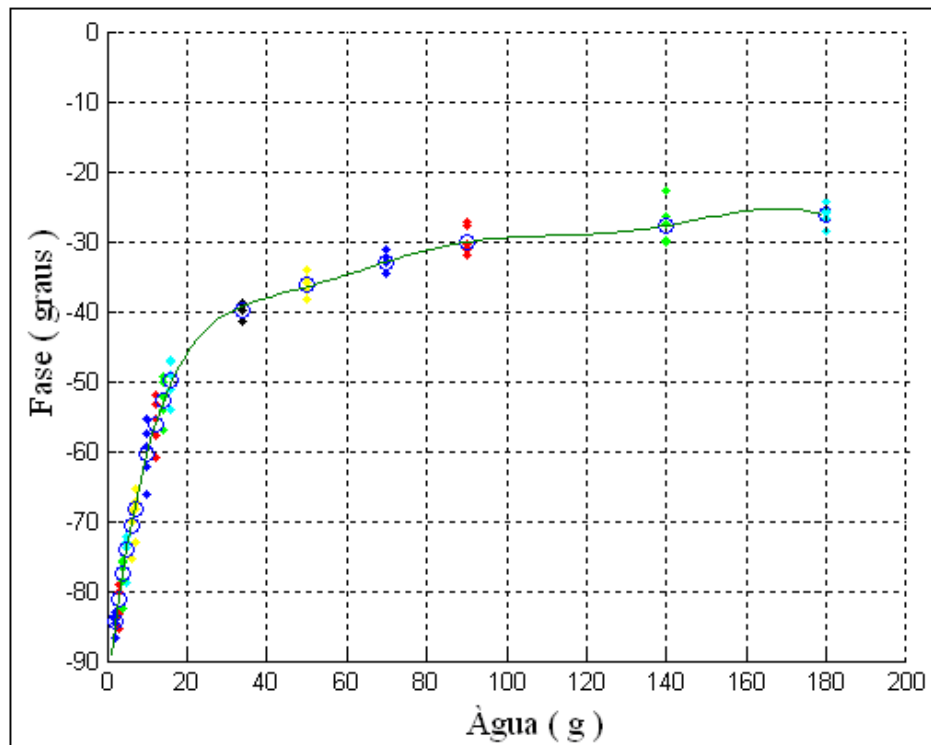


**Figura 4.2 -Fase e frequência, em função da variação da quantidade de água adicionada. Varredura de 40 Hz à 10 MHz.**



A partir dos resultados obtidos anteriormente, deu-se continuidade no estudo para frequência de 1 MHz, pois verificou-se nessa frequência uma variação expressiva da fase da impedância e minimizou-se os efeitos da alta frequência sobre o cabo.

Ainda fazendo-se uso dos dados coletados nos teste preliminares utilizando o analisador de impedância, verificou-se a repetitividade nas leituras para cada índice de água, comprovando a eficácia do método na aquisição da umidade relativa, tendo-se, com o acréscimo de água, a tendência na diminuição da variação da fase conforme evidenciada também pela equação 4.1 que rege a curva dos pontos médios da figura 4.3.



**Figura 4.3 -Variação da fase em função da quantidade de água (f = 1MHz)**

$$\text{Fase} = 1,18 \times 10^{-12} \times S^7 + 9,07 \times 10^{-7} \times S^6 + 2,75 \times 10^7 \times S^5 + 4,43 \times 10^3 \times S^4 + 3,89 \times 10^3 \times S^3 + 0,189 \times S^2 + 4,89 \times S + 9382 \quad (4.1)$$

onde “s” é a quantidade de água adicionada (g).

As figuras 4.4 e 4.5, apresentam os sinais da tensão, corrente e fase (representado pela saída do MPY 634 com ganho de 1,5 V/V), obtidos da placa de aquisição – impedanciometria, com auxílio do osciloscópio. Verificou-se o aumento

dos valores de fase em função do acréscimo de água, assim como o evidenciado nos testes preliminares utilizando-se o analisador de impedância agilent 4294a.

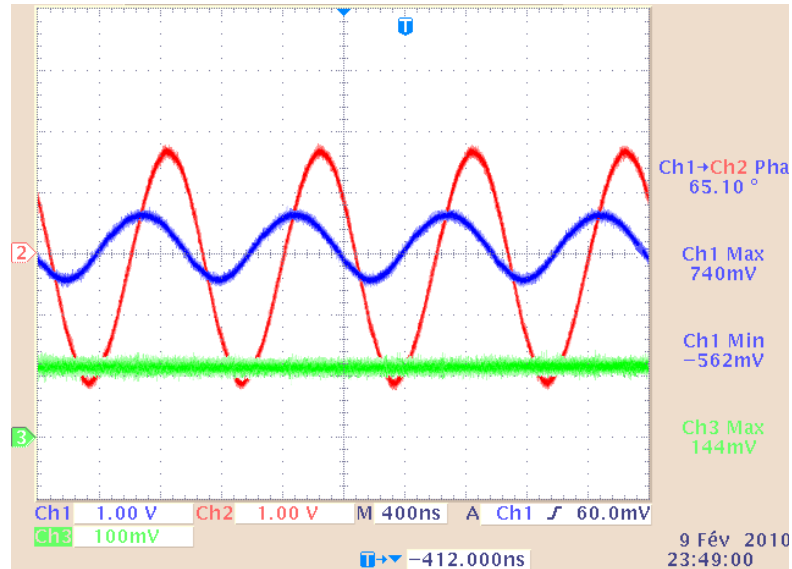


Figura 4.4-Amostra1. Relação da variação da fase para 1 g de água adicionada. Em azul encontra-se o sinal da corrente, em vermelho o sinal da tensão e em verde o sinal de saída do CI MPY634 com ganho de 1,5 V/V.

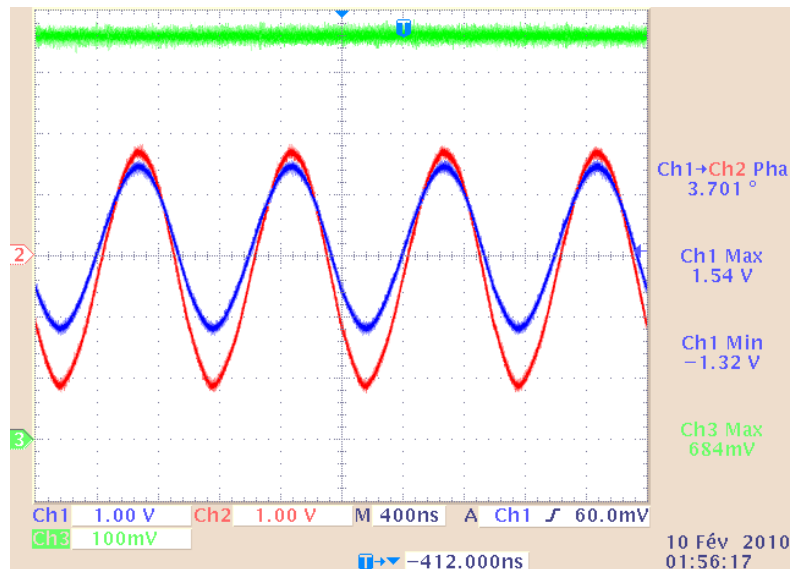


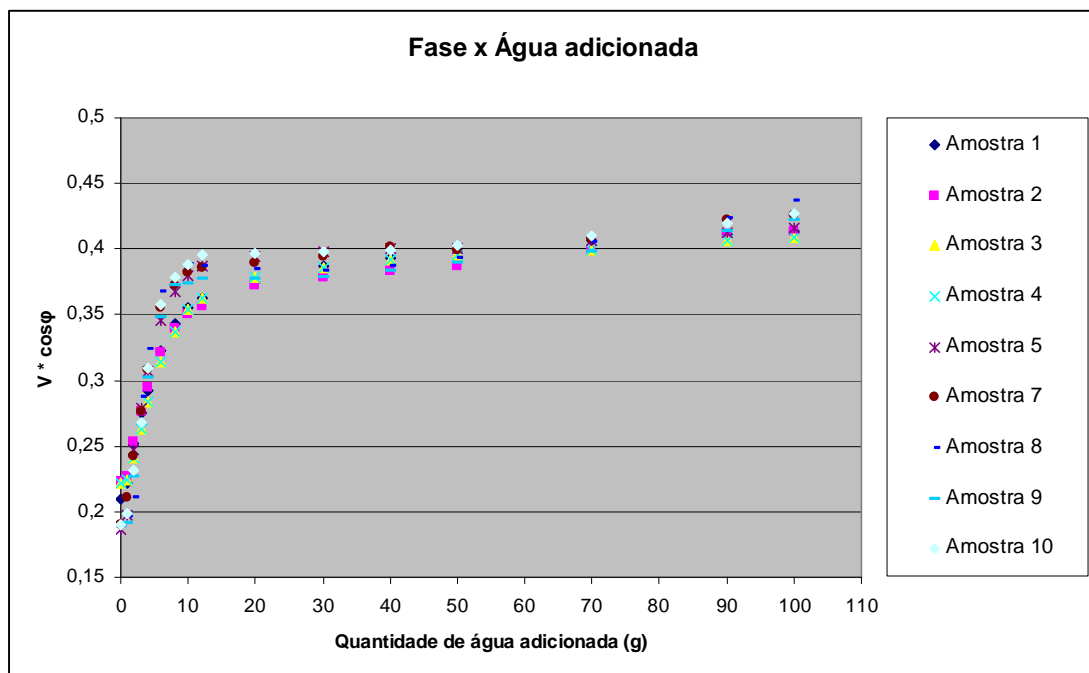
Figura 4.5 - Amostra1. Relação da variação da fase para 70 g de água adicionada. Em azul encontra-se o sinal da corrente, em vermelho o sinal da tensão e em verde o sinal de saída do CI MPY634 com ganho de 1,5 V/V.

Percebe-se nas figuras anteriores o aumento da amplitude de corrente com o acréscimo de água no sistema. Essa variação ocorre devido à diminuição da

resistência elétrica “ $X_c$ ”, em função do aumento da permissividade dielétrica “ $\epsilon_r$ ”, tendo visto que a tensão é constante para toda excursão da análise.

Na figura 4.6 são apresentados os resultados obtidos através do sistema de aquisição da impedância. Visto que não ocorre variação da tensão em todo o processo de medição, foi gerado o gráfico de “ $V * \cos \varphi$ ”, em função do acréscimo de água no solo. Não estão apresentados nessa figura os dados referentes à análise da Amostra 6, devido a erros ao coletar os dados no display para a planilha de coleta de dados apresentada no apêndice desse trabalho. As primeiras dez amostras foram coletadas com tempos de espera semelhantes e em temperatura ambiente de aproximadamente 28,5 °C.

Assim como nos resultados obtidos através do analisador de impedância agilent 4294a, verifica-se a linearidade da relação entre a umidade e fase para valores iniciais de umidade, e uma diminuição da variação da fase com o aumento da umidade.



**Figura 4.6 – Variação da fase em função do acréscimo de água, analisada em temperatura ambiente, para as amostras de 1 à 10.**

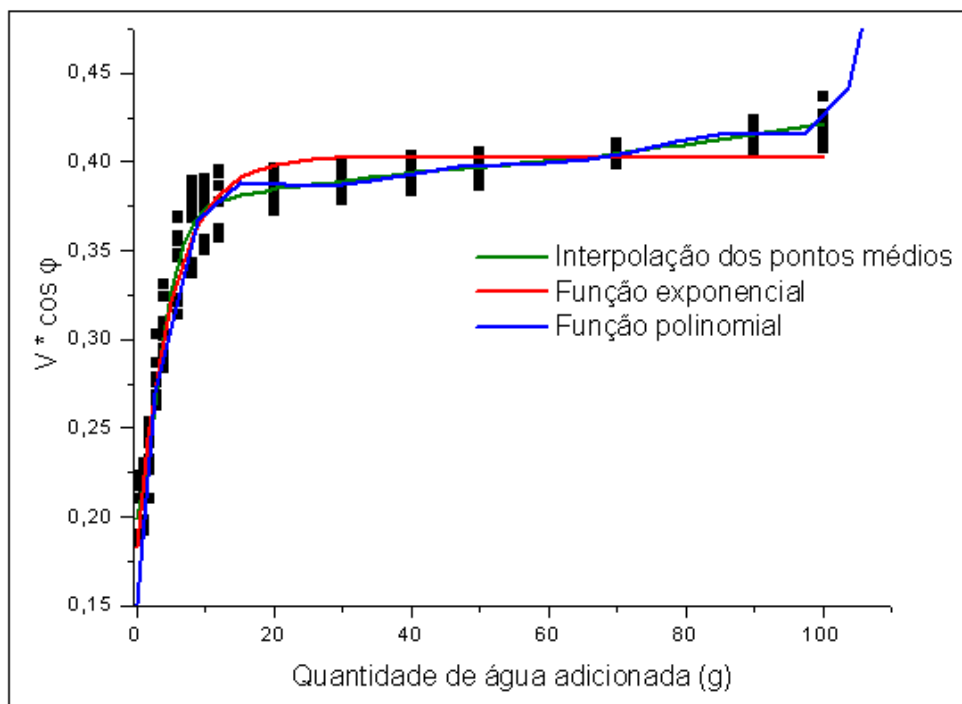
A figura 4.7 apresenta os resultados obtidos pelo sistema implementado, contendo a função que interpola os pontos médios das amostras, a função polinomial com índice de correlação  $R^2 = 0,9908$  e a função exponencial, com índice de correlação  $R^2 = 0,95$ , que caracteriza a variação da fase ( $V * \cos \varphi$ ) em função da

quantidade de água adicionada. As equações 4.2 e 4.3, apresentam respectivamente equação polinomial e exponencial, do gráfico da figura 4.7.

$$V * \cos \varphi = 0,18302 + 0,4025 * x - 0,0031 * x^2 + 1,2078 * 10^{-4} * x^3 - 2,59619 * 10^{-6} * x^4 + 3,11821 * 10^{-6} * x^5 - 1,95782 * 10^{-10} * x^6 + 4,99974 * 10^{-3} * x^7 \quad (4.2)$$

$$V * \cos \varphi = 0,40284 - 0,1988e^{\frac{-x}{5,18216}} \quad (4.3)$$

onde “x” é o conteúdo de água adicionada (g).

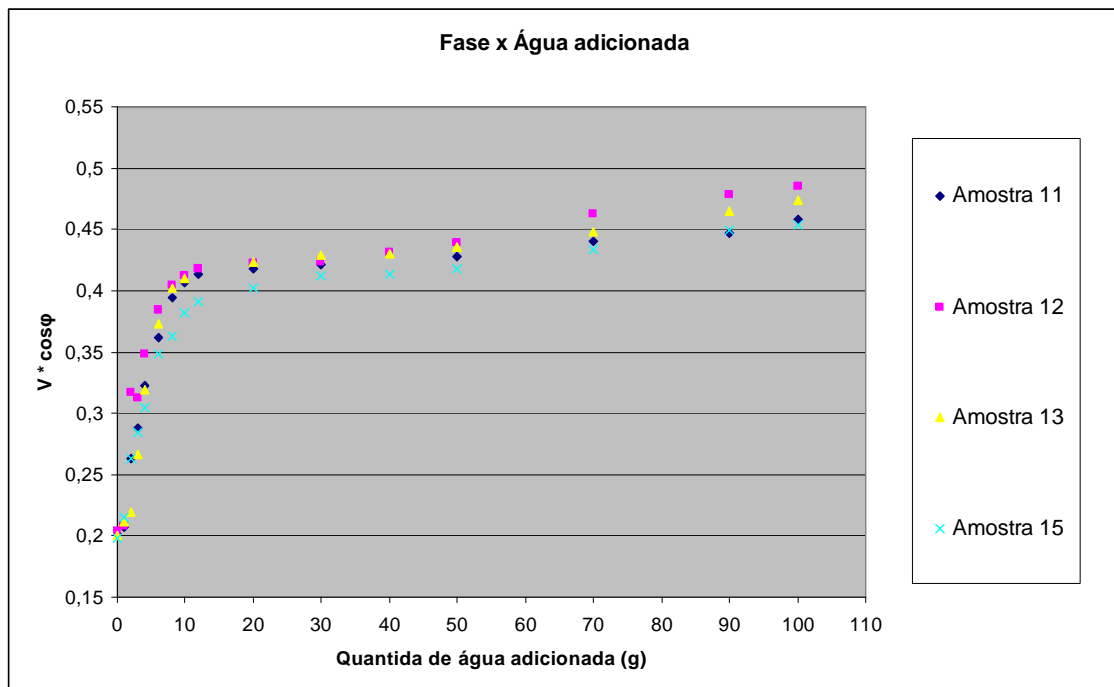


**Figura 4.7 – Resultados obtidos, através do sistema implementado, utilizando-se interpolação dos pontos médios (verde), função exponencial (vermelho) e função polinomial (azul), para caracterização da relação entre a variação da fase ( $V * \cos \varphi$ ) em função da quantidade de água adicionada, na análise das amostras de 1 à 10.**

Fez-se também a análise da variação de fase com intervalos de espera maiores, para acréscimos de água superiores a 20 g (Amostras 11 a 15). Esses testes foram realizados com o intuito de verificar o comportamento da resposta do

sistema em função do aumento do tempo de espera após adição da água. Verifica-se na figura 4.8 que o aumento do tempo de espera resultou no aumento do valor da fase, sendo atribuído pelo preenchimento de água dos poros no lugar antes ocupados pelo ar. Ainda na figura 4.9, foi analisado a influência do valor da fase em função do acréscimo da temperatura (Amostra 13), e com o acréscimo de 24% de calcário dolomítico tipo D (Amostra 15).

Conforme Eller (1995), atribui-se um pequeno aumento do valor da constante dielétrica, visualizada no presente estudo pelo aumento da fase da impedância, em função do aumento da temperatura na faixa de 0 °C a 30 °C, não ficando evidente na Amostra 13 (amostra com temperatura de aproximadamente 38 °C) um aumento substancial no valor da fase quando comparado às Amostras 11 e 12 (temperatura ambiente aproximada de 30 °C). Na Amostra 15, com calcário dolomítico tipo D, verificou-se uma pequena diminuição dos valores da fase para acréscimos de água inferiores a 30 g, essa diminuição pode ser atribuída à velocidade de absorção da água quando comparada às demais amostras, pois o solo ficou mais compacto com o acréscimo de calcário.

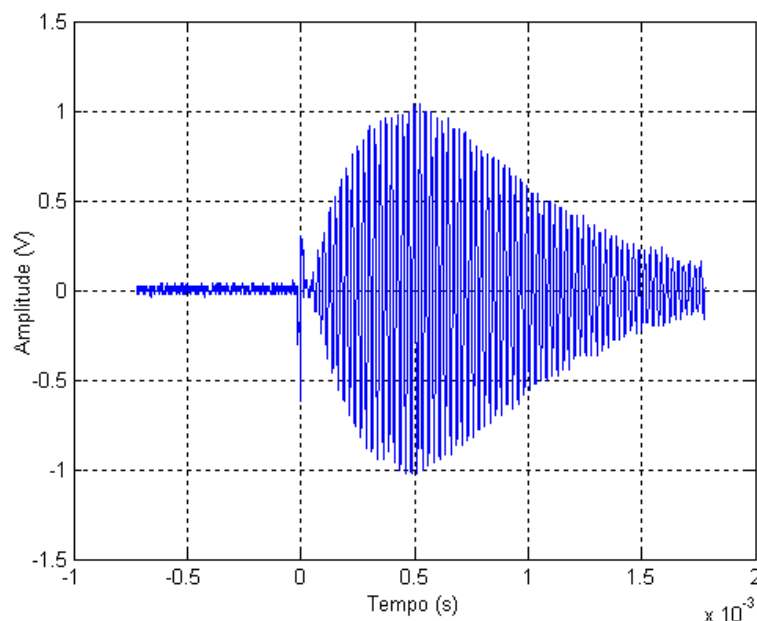


**Figura 4.9 - Variação da fase em função do acréscimo de água para tempos de espera aumentados para quantidade de água acrescentada superior à 20 g (Amostras 11 à 15), assim como o aumento da temperatura em 10 °C (Amostra 13) e com acréscimo de 24% de calcário dolomítico tipo D (Amostra 15).**

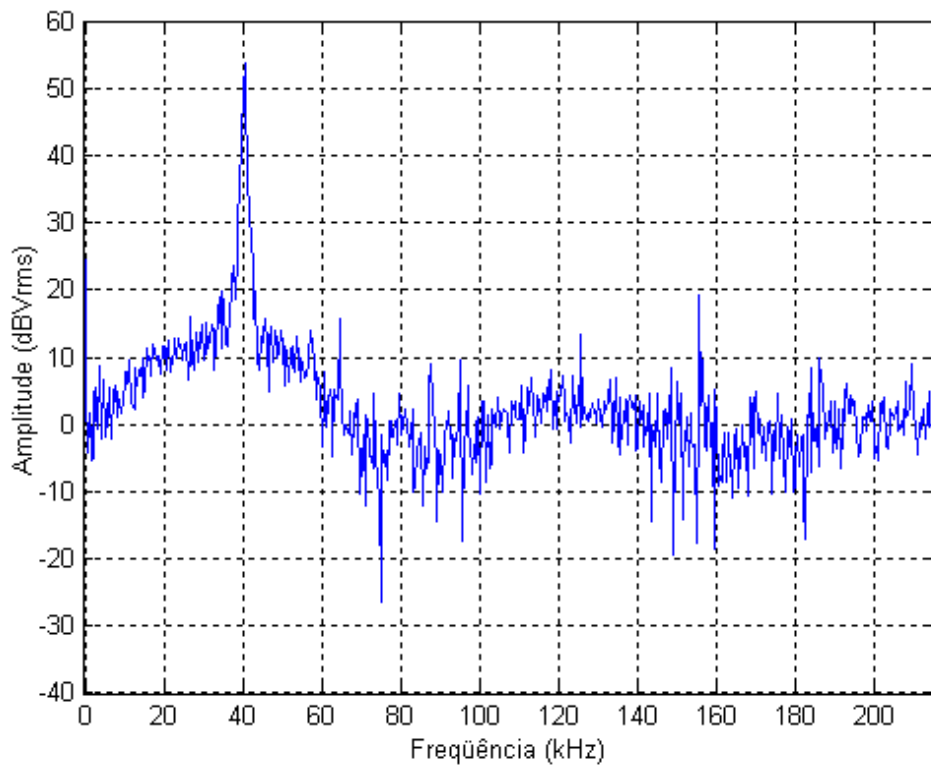
#### 4.1.2 Resultados e discussões - método ultrassônico

Devido à grande atenuação do sinal ultrassônico em relação ao aumento da umidade relativa do solo, os estudos se limitaram à análise dos testes preliminares realizados, pois, embora tenham sido testados vários modelos de transdutores ultrassônicos com diferentes freqüências de ressonância, e amplitude de tensão de trabalho, os resultados obtidos ficaram semelhantes aos coletados nos testes preliminares, pois os sistemas utilizados para a geração do pulso ultrassônico estavam limitados a potência de 100 W, com tensão máxima de excitação inferior a 200 V, não sendo o suficiente para se excitar o transdutor de forma a obter uma onda ultrassônica capaz de atravessar o solo com um nível de amplitude na recepção suficiente para ser detectada pelo sistema de aquisição. Esta atenuação em função da adição de água no solo também é evidenciada por Leong (2004).

Nas figuras 4.10 e 4.11 são apresentadas, no tempo e na freqüência, a resposta característica dos sensores ultrassônicos Murata ao atravessar o ar, evidenciando a banda estreita na aquisição do sinal, impossibilitando assim a realização de estudos em banda larga com os mesmos.



**Figura 4.10 - Sinal ultrassônico ao atravessar 17 mm de ar.**



**Figura 4.11 - FFT do sinal ultrassônico ao atravessar 17 mm de ar.**

Na análise do sistema ultrassônico foram coletados os dados para três níveis de umidade na terra e uma aquisição no ar como meio de referência, que podem ser visualizados na tabela 4.1.

**Tabela 4.1 –Atenuação da onda ultrassônica em função da variação da umidade ao atravessar 4 mm de solo.**

Meio	Tensão pico a pico (V)
Ar	2,08
Terra seca	0,90
Terra úmida (70 g de água)	0,51
Terra extremamente úmida (215 g de água)	0,08

Verificou-se que há grande atenuação do sinal da onda ultrassônica com o aumento da umidade. Tal atenuação ocorre devido ao fato da mistura água e terra

criarem uma grande variação de meio, causando várias reflexões e transmissões da onda.



## 5 CONCLUSÕES

Verificou-se, através do sistema desenvolvido, uma diminuição da defasagem entre a tensão e a corrente, ou seja, um aumento do fator de potência ou aumento da constante dielétrica do sensor com o aumento da quantidade de água inserida nas amostras submetidas a uma frequência de testes (no caso, 1 MHz).

Ocorreram pequenas variações entre amostras, sendo estas atribuídas ao fato da mistura solo-água não estarem uniformemente distribuídas de forma a se obter condições idênticas de absorção de água entre as análises. Foi obtida uma relação logarítmica entre a variação da fase da impedância em relação ao acréscimo de água no solo, exigindo, assim, o aumento na sensibilidade e exatidão do sistema de medição com o aumento da umidade relativa do solo.

Analisando as respostas geradas pelo analisador de impedância e pela placa de aquisição – impedanciometria, verificou-se que o sistema confeccionado atingiu o objetivo de analisar a defasagem entre tensão e corrente do sensor de placas paralelas, pois ambos os sistemas identificaram a relação logarítmica crescente da variação da fase em função do aumento da umidade.

Mesmo com dados ainda limitados da variação do sinal ultrassônico com o acréscimo da umidade, obteve-se resultados expressivos da variação da atenuação da onda ultrassônica, com os transdutores trabalhando no modo transmissão/recepção, que poderão viabilizar estudos mais aprofundados para a construção de equipamentos utilizando tal técnica.

O *hardware* e *firmware* implementados, embora tenham atingido o objetivo de tratar as amostras do sensor de placas paralelas em menos de 1 segundo, não foi capaz de realizar a aquisição do sinal ultrassônico, pois, o circuito de excitação do transdutor de transmissão, não possuía potência suficiente para a gerar uma onda ultrassônica capaz de atravessar 24 mm de solo de forma a caracterizar o nível de amplitude da tensão do sinal recebido em função da baixa relação sinal-ruído do mesmo.

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se uma melhor análise dos sinais fornecidos pelos sensores de placas paralelas, para diferentes tipos de solo e diferentes níveis de temperatura, buscando

correlacionar à variação da fase em função da umidade relativa do solo, fazendo-se uso dos valores da variação da resistência, ou corrente, pois no estudo apresentado a tensão é constante, como forma de correção das variações de textura, estrutura e composição química do solo, assim como fazendo uso da temperatura do solo para correção da correlação entre defasagem e umidade.

Na análise dos sinais ultrassônicos, faz-se necessário implementação de um circuito de alta potência ou então utilizar um amplificador de sinais comercial, com potência superior a 100 W, para excitar os transdutores de ultrassom e permitir um aumento na relação sinal-ruído para a caracterização adequada do solo em função da atenuação e tempo de propagação das ondas ultrassônicas no meio, assim como em trabalhos correlatos (LEONG, 2004 e CARRULHO, 1997).

## REFERÊNCIAS

AGILENTE TECHNOLOGIES, INC. **Operation Manual. 7. ed**, 2003. 469 p. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/04294-90060.pdf>>. Acesso em: 25/05/2009.

AGUIAR, Maria I. de. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008. 89 f Dissertação (*Magister Scientiae*) – Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, 2008.

ANALOG DEVICES, INC. **AD9832, CMOS Complete DDS**, Rev. A, 1999. 16 p.. Disponível em: <[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD9832.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9832.pdf)>. Acesso em: 13/02/2010.

ANDRADE, C. L. T. et al. . Parâmetros de solo-água para a engenharia de irrigação e ambiental. **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – Simpósio: Manejo de Irrigação**, v. 27. p. 1-132, 1998.

ASSEF, Amauri A. **Sistema de aquisição e processamento de sinais de ultra-som para caracterização de meios biológicos e não biológicos**. 2006, 153 f. Dissertação (Mestre em Ciências) – Área de concentração: Engenharia Biomédica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

ASSIS, Cleber. D. de. **Avaliação de uma sonda TDR helicoidal para a estimativa do teor de umidade dos solos em campo e laboratório**. 2008. 178f. Dissertação (Mestre em Geotecnia) - Curso de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade, São Paulo, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 06457**: preparação de amostras de solos para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro. 1986. Versão 2009.

ÁVILA, Frederico F. de. **Análise da cobertura pedológica em uma topossequência na bacia do córrego dos pereiras** – depressão de Gouveia/MG. 2009, 133 f. Dissertação (Mestre em Geografia) – Área de concentração: Análise Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

BERNARDI, Cristina C. **Reuso de água para irrigação**. 2003. 52f. Monografia (Especialização *Lato Sensu* em Gestão Sustentável da Agricultura Irrigada) – ISEA-FGV / ECOBUSINESS SCHOOL, Brasília, 2003.

BERNARDI, Ricardo. **Desenvolvimento de um equipamento para estudo de eletrocirurgia com controle de potência ativa**. Dissertação (Mestre em Ciências) – Área de concentração: Engenharia Biomédica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

BRONZINO, J. D. **Biomedical engineering and instrumentation: Basic concepts and application**. BWS-Kent, p. 347-386, 1986.

BURR-BROWN PRODUCTS FROM TEXAS INSTRUMENT, INC. **MPY634 datasheet, Wide Bandwidth Precision Analog Multiplier**, rev. A, 2004. 14 p. Disponível em: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/mpy634.pdf>>. Acesso em: 19/02/2010.

CARRULHO, A.; PARVIS, M.; VALLAN, A.. Water content measurement in granular materials using ultrasonic waves. **IEEE Instrumentation and Measurement: Technology Conference**, p. 19 – 21, May, 1997

CASTRO, Orlando. M. de. Conservação do Solo e Qualidade dos Sistemas Produtivos. **O Agrônomo**, Campinas, v. 42, p. 110-117, 1991.

COLETTI, Christiane. **Caracterização da irrigação de uma cultura citrícola com a utilização do TDR**. 2000. 85 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) – Área de concentração: Água e Solo, Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP , 2000.

DACIUK, Rafael J. . **Estudo de parâmetros ultra-sônicos para caracterização de líquidos**. 2008, 111 f. Dissertação (Mestre em Ciências) – Área de concentração: Engenharia Biomédica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

DAILY et al. Produção de Alimentos, Crescimento Populacional e Meio Ambiente. **Science**, v. 281, p. 1291 – 1295, 1998

DeCARLO, R. A.; PEN-MIN, L. **Linear circuits analysis, volume I: a time domain and phasor approach**. New Jersey: Prentice Hall College Div., 1995. 399 p.  
Design Explorer: complete board-level design system. version 2003. Altium Limited. 1 CD-ROM

DIAS, Nildo da S. et al. . Manejo da fertirrigação e controle da salinidade do solo sob ambiente protegido, utilizando-se extratores de solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande / PB, v. 9, n. 4. p. 496 - 504, 2005.

DORABIATO, Luis F. **Sistema de Ultra-som para Caracterização de Leite Bovino** - Dissertação (Mestre em Ciências) – Área de concentração: Engenharia Biomédica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007

DORAN, J. W.; PARKIN, B. T. Defining and Assessing Soil Quality. **Soil Science Society of America**, n. 35, p. 3–21, 1994.

DRNEVICH, Vincent P. et al. . Temperature effects on dielectric constant determined by time domain reflectometry. **Soil Dynamics Symposium in Honor of Professor Richard D. Woods**. 2005

EHLERS, Eduardo. Agricultura sustentável: origens e perspectivas de um novo paradigma. 2. ed. **Guaíba: Agropecuária**, 1999.

ELETRÔNICA24H: Análise de Circuitos em Corrente Alternada. Disponível em: <<http://www.eletronica24h.com.br/Curso%20CA/aparte2/aulas/aula004.html>>. Acesso em: 01/05/2010.

ELLER H.; DENOTH A. . A capacitive soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, v. 185, p. 137-146, nov. 1995.

ELLER, H; DENOTH, A.. A capacitive soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, v. 185, p. 137-146, 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 2. ed., 306 f, Rio de Janeiro, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA), Centro Nacional de Pesquisa de Solo. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 412f, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Agricultura Orgânica: Instrumento para a Sustentabilidade dos Sistemas de Produção e Valoração de Produtos Agropecuários. n. 122, dez. 2000. Disponível em: [www.cnpab.embrapa.br/publicacoes/download/doc122.pdf](http://www.cnpab.embrapa.br/publicacoes/download/doc122.pdf). Acesso em: 01 abril 2010.

FISH, P. **Physics and instrumentation of diagnostic medical ultrasounds**. New York: John Wiley & Sons, 1990, 250p.

FREDERICK, J. R. **Ultrasound engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1965, 379p.

GARCIA, M. O.; MAIA, J. M.. Unidade de controle, aquisição, processamento e transferência de sinais de ultra-som. **XIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR**, Curitiba, 2008

GEVAERD, Rodrigo et al.. Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera. Parte II: Impacto da umidade do solo e da parametrização de *cumulus* na simulação de uma linha seca. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3a, p. 74-88, 2006.

GEVAERD, Rodrigo; FREITAS, Saulo. Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera Parte I: descrição da metodologia e validação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 1-15, 2006.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, A. P.. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 155 -164, 1999.

GOOGLE INC. Google Maps. Disponível em: <<http://www.maps.google.com.br>>. Acesso em 29/03/2010.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl - **Fundamentos de Física 3 – Eletromagnetismo**, v. 3, 8. ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos Científicos (LTC), 2009.

HICKEY, Henry. V. . **Elements of electronics**. New York: McGraw-Hill, 1961. 549 p.

HITACHI HIGH TECHNOLOGIES AMERICA, INC. **HD44780U (LCD-II)**. 1998. 60 p. Disponível em: <<http://www.hitachi-displays.com/en/index.html>>. Acesso em: 16/03/2010.

IAR Embedded Workbench for MSP430. versão 2009 IAR System AB. Disponível em: <<ftp://ftp.iar.se/WWWfiles/datasheet/New/DS-EW430-420.pdf>>. Acesso em: 28/02/2010.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1493-1500, 2000.

Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM). Produto 7. **Diagnóstico Municipal Integrado**, 2007. Disponível em: [http://www.boavista.rr.gov.br/produtos/produto7/07\\_DiagInt\\_SaneamAmbiental3.PDF](http://www.boavista.rr.gov.br/produtos/produto7/07_DiagInt_SaneamAmbiental3.PDF). Acesso em: 01 abril 2010.

IOPE Instrumentos de precisão LTDA. **Termômetro digital 10Ptherm 42**. Disponível em: <[http://iope.com.br/index\\_port.htm](http://iope.com.br/index_port.htm)>. Acesso em: 27/03/2010.

JACOMINE, Paulo K. T.. A Nova versão do sistema brasileiro de classificação de solos (SiBCS). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2005. Disponível em: <[www.cnps.embrapa.br/sibcs/download/ata10.pdf](http://www.cnps.embrapa.br/sibcs/download/ata10.pdf)>. Acesso em: 19/02/2010.

JAKEVICIUS, L.; DEMCENKO, A. Ultrasound attenuation dependence on air temperature in closed chambers. **Ultragarsas (ULTRASOUND)**, v. 63, n. 1, p. 18 - 22, 2008.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 272 p.

KRAUTKAMER, J. e KRAUTKAMER, H. **Ultrasonic Testing of Materials**, 4. ed. Springer-Verlag, Berlim/Heidelberg, Germany.

KUTILEK, Miroslav; NIELSEN, Donald. R. Soil Porous System. **Soil Hydrology**, Germany,. p. 16-27, 1994.

LACERDA, Rogério D. de et al. Avaliação de um TDR para determinação do conteúdo de água do solo. **Revista de biologia e ciências da terra**, v. 5, n.1, p. 5 – 17, 1º semestre 2005.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. **Soil Society of America**, n. 35, 1994.

LEÃO, RAIMUNDO A. de O. et al. Desenvolvimento de um dispositivo eletrônico para calibração de sensores de umidade do solo. **Engenharia Agrícola de Jaboticabal**, v.27, n.1, p.294-303, jan./abr. 2007.

LEÃO, Raimundo A. de. . **Desenvolvimento de dispositivo para calibração de sensor de umidade do solo e aplicação em sensores tipo Tensiômetro Eletrônico e Resistência Elétrica**. 2004. 72 f. Dissertação (Mestre em Agronomia Irrigação) - Curso de Mestrado em Irrigação e Drenagem, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

LEONG, Eng-Choon; YEO, Sir-Hoon; RAHARDJO, Harianto. Measurement of wave velocities and attenuation using an ultrasonic test system. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 41, p. 884-860, 2004.

LEPSCH, Igo. F. **Formação e Conservação dos Solos**. São Paulo. Oficinas de Textos, 2002.

LIBARDI, Paulo L.. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. Piracicaba: EDUSP - Editora da Universidade de São Paulo, 1999.

LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. **LTC6903/LTC6904, 1kHz - 68MHz Serial Port Programmable Oscillator**, 2003. 12 p. Disponível em: <<http://cds.linear.com/docs/Datasheet/69034fc.pdf>>. Acesso em: 19/02/2010.

MAIA, Joaquim M. **Sistema ultra-sônico para auxílio ao diagnóstico da osteoporose**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2001.

MANIERI, Juliana M.; VAZ, Carlos M. P.; MARIA, Isabella C. de . Sonda espiral de TDR para medida da umidade no perfil do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 191 – 198, 2007.

MANTOVANI, E. C., Agricultura de precisão e sua organização no Brasil. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 25, n. 1, p. 77-92, 2000.

MUGGLER, Cristine C. et al. Educação em solos: princípios, teoria e métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 733 - 740, jul./ago.2006.

MURATA MANUFACTURING COMPANY, LTD. **Catalog Number.P19E-9 - Piezoelectric Ceramics Sensors**, 2008. 24 p. Disponível em: <<http://www.murata.com/catalog/p19e.pdf>>. Acesso em: 25/05/2009.

NADLER, A.; LAPID, Y. An improved capacitance sensor for *in situ* monitoring of soil moisture. **Australian Journal of Soil Research**. v. 34, n. 3, p. 361-368, 1996.

NATIONAL, INC. **LM318 datasheet, LM118/LM218/LM318 Operational Amplifiers**, 2000. Disponível em: <<http://www.national.com/ds/LM/LM118.pdf>>. Acesso em: 19/02/2010.

NDT Resource Center: Characteristics of Piezoelectric Transducers. Disponível em: <<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/characteristicspt.htm>> Acesso em: 01/05/2010.

NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 31, p. 213–237, 2001.

OIEA (ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATOMICA). **Sondas De Neutrones Y Gamma: Sus Aplicaciones En Agronomía**, OIEA, 2 ed., Viena, 2003.

OLIVEIRA, Jesiel A.; PINHO, João T.. Medição da Permissividade Elétrica de Produtos Naturais. 2005, 6 p. **GEDAE/UFPA**. Disponível em:<[www.ufpa.br/gedae/SBMO2002\\_02.PDF](http://www.ufpa.br/gedae/SBMO2002_02.PDF)>. Acesso em: 01/05/2010.

OLYMPUS NDT, INC. (Panametrics). **NDT Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing**. 2009. 52 p. Disponível em: < <http://www.olympusims.com/data/File/panametrics/panametrics-UT.en.pdf>>. Acesso em: 25/05/2009  
Orcad release 9. Cadence Design System, Inc. 1999. 1 CD-ROM

PÁDUA, Tullio R. P. de et al.. Calagem em latossolo sob influência de coberturas vegetais: neutralização da acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 869 – 878, 2006.

PARIS, Demetrius. T.; HURD, F. K. **Teoria eletromagnética básica**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1984.

PEDROTTI, Alceu et al. . Tomografia computadorizada aplicada a estudos de um planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 7, p. 819-826, jul. 2003.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; McMAHON, T. A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology earth system science**, v. 11, p. 1633-1644, 2007.

PROCÓPIO, S.O.2, et al. . Ponto de murcha permanente de soja, feijão e plantas daninhas. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 22, n. 1, p. 35 - 41, 2004.

REICHARDT, Klaus. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4. ed. Campinas: Fundação Cargil, 1985. 443p.

REINERT, Dalvan J.; REICHERT, José M. .Propriedades física do solo. **Universidade Federal de Santa Maria: Centro de Ciências Rurais**. Santa Maria, maio 2006. Disponível em: <[http://w3.ufsm.br/fisica\\_e\\_genese/Graduacao/Fisica/Propriedades\\_fisicas\\_do\\_solo\\_I\\_semestre\\_2006.pdf](http://w3.ufsm.br/fisica_e_genese/Graduacao/Fisica/Propriedades_fisicas_do_solo_I_semestre_2006.pdf)>. Acesso em: 12/04/2010.

RIBEIRO, Tulio A. P. **Estudo dos parâmetros básicos de irrigação por microaspersão para a cultura do limão tahiti**. 1993. 165 f. Dissertação (Mestre em engenharia civil ) – Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento, Faculdade de Engenharia Civil – Unicamp.

ROQUE, Wellington. **Desenvolvimento de um multi-sensor eletrônico para medida da umidade, temperatura e condutividade elétrica do solo**. 2008. 46f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. São Paulo. Campinas, 2008.

SAARENKETO, Timo. Electrical properties of water in clay and silty soils. **Journal of Applied Geophysics**, v. 40, p. 73-80, mar. 1998.

SANS, L. M. A.. Avaliação da qualidade do solo. **Agricultura, sustentabilidade e o sime-árido**. Fortaleza, p. 170-213, 2000.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE); Curso de recuperação de áreas degradadas, 2005.

SILVA, Cláudio S. da; FALCÃO, Cleire L. da C.; SOBRINHO, José F..O Ensino do solo no livro didático de geografia. **Revista Homem, Espaço e Tempo. Centro de Ciências Humanas da Universidade Estadual Vale do Acaraú**, ano II, n. 1, mar. 2008.

SILVA, Ilda de O.. **Desenvolvimento de um sensor capacitivo para o monitoramento de umidade do solo**. 2005. 86f. Dissertação (Mestre em Irrigação e Drenagem) Curso de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

SOUZA, Claudinei F.; MATSURA, Edson E. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 63 – 68, 2002.

TEKTRONIX, INC. **Digital Storage Oscilloscopes TDS1000B Series and TDS2000B Series**. Disponível em: <<http://www2.tek.com/cmswpt/psdetails.lotr?ct=PS&cs=p&ci=13295&lc=EN>>. Acesso em: 27/05/2009.



TEXAS INSTRUMENTS, INC. **ADS5410 datasheet, Analog-to-digital converter**, 2002. 18 p. Disponível em: < <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ads5410.pdf>>. Acesso em: 19/02/2010.

TEXAS INSTRUMENTS, INC. **Data Manual - MSP430xG461x MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER**, Rev.H, 2009. 107 p. Disponível em: < <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fg4618.pdf> >. Acesso em: 13/02/2010.

TEXAS INSTRUMENTS, INC. **SN74V263, SN74V273, SN74V283, SN74V293 3.3-V CMOS FIRST-IN, FIRST-OUT MEMORIES**, rev.D, 2003. 52 p. Disponível em: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/sn74v293.pdf>>. Acesso em: 19/02/2010.

TEXAS INSTRUMENTS, INC. **TUSB3410, TUSB3410I USB to Serial Port Controller**, Rev. H, 2010. 98 p. Disponível em: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tusb3410.pdf>>. Acesso em: 19/02/2010.

TEXAS INSTRUMENTS, INC. **User Guide ADS5410 EVM**, 2001. 18 p. Disponível em: <<http://focus.ti.com/lit/ug/slau082/slau082.pdf> >. Acesso em: 19/02/2010.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ARMAN, A. N. . Eletromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission line. **Water Resource Research**, v. 16, n. 3, p. 574-582, 1980.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M.. Microorganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. **Tópico em Ciências do solo: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo**, v. 2, p. 195-276, 2002.

TRINTINALHA, M. A. et al. Comparação dos sistemas TDR e ECHO para medida de umidade, em um solo argiloso e em areia, **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 26, n. 3, p. 97-103, 2004.

VELDKAMP, Edzo; O'BRIEN, Joseph. J. . Calibration of a Frequency Domain Reflectometry Sensor for Humid Tropical Soils of Volcanic Origin. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 5, p. 1.549 - 1.553, set./out. 2000.

VOTRUBOVÁ, Jana et al..The relationships between MR parameters and the content of water in packed samples of two soils. **Geoderma 95 (2000)**, p. 267-282, out. 1999.

WEBSTER, J. G. **Medical instrumentation: Application and design**. 3. ed., New York: John Wiley & Sons, 1998, 691p.

WONG, George S. K.; EMBLETON, Tony F. W.. Variation of the speed of sound in air with humidity and temperature. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 77, p. 1710-1712, maio 1985.

YOUNG, S. R. **The effect of therapeutic ultrasound on the biological mechanisms involved in dermal repair**. 1990 Tese (Doutorado em Física) - University of London, London, 1990.

CURTIS, H. L.; DEFANDORF, F. M.. **Dielectric constant and dielectric strength of elementary substances, pure inorganic compounds, and air**. In: Washburn, E.D. (Ed.), **International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry, and Technology**, v. 6. McGraw-Hill, New York, p. 73 – 107, 1929.

**ANEXOS**

## ANEXO A – Análise do solo

### DADOS ANALÍTICOS:

Prof.	Composição granulométrica g kg <sup>-1</sup>				Argila dispersa g kg <sup>-1</sup>	Grau de floculação	Relação silte/ argila
	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila			
Sônia Zanello							
	-	-	-	-			

Hor.	Prof.	Complexo sortivo cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>								V%	m%
		Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Na <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	CTCef	CTCT		
		14,3	4,0	0,4	0,5,	0,0	4,6	18,6	23,3	80	2,7

CTCef = ctc no pH natural do solo; CTCT= ctc em pH 7,0; V%= saturação em bases; m%= saturação em alumínio.

Hor.	Prof.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	pH <sub>H2O</sub>	pH <sub>CaCl2</sub>	C(g kg <sup>-1</sup> )	MO (g kg <sup>-1</sup> )	P(mg L <sup>-1</sup> )	Ki	Kr
			6,8	6,1					

Observação: Com a quantificação de Na e K obtemos os valores de CTCef, CTCT, V% e m% .

Cálculos: V% = SB x 100 / CTCT = 80 %

m % = Al x 100 / CTCef = 2,7 %

## APÊNDICES

### APENDICE A – Testes da variação da fase e corrente em função da umidade

V =const.	AMOSTRA		DATA		V =const.	AMOSTRA		DATA	
	1					2			
<b>SECO</b>	F =	211	Temp. inicial 23,5 °C		<b>SECO</b>	F =	244	Temp. inicial 25,9 °C	
	I =	328				I =	376		
<b>5 MIN.</b> 1g	F =	226			<b>5 MIN.</b> 1g	F =	252		
	I =	334				I =	385		
2g	F =	257	<b>Temp. final</b> 23,9 °C		2g	F =	284	<b>Temp. final</b> 26,5 °C	
	I =	335				I =	390		
3g	F =	283			3g	F =	310		
	I =	339				I =	389		
4g	F =	304	Peso amostra Peso com becker		4g	F =	332	Peso amostra Peso com becker	
	I =	346				I =	393		
<b>8 MIN.</b> 6g	F =	346	114,6 g 360,6 g	<< amostra << becker +amostra	<b>8 MIN.</b> 6g	F =	374	114,6 g 360,6 g	
	I =	364				I =	412		
8g	F =	383	<b>Hora inicial</b> 01:50		8g	F =	409	<b>Hora inicial</b> 17:05	
	I =	387				I =	433		
10g	F =	411			10g	F =	439		
	I =	408				I =	460		
12g	F =	435	Hora final 04:10		12g	F =	461	Hora final 19:25	
	I =	432				I =	479		
<b>12 MIN.</b> 20g	F =	476			<b>12 MIN.</b> 20g	F =	518		
	I =	468				I =	530		
30g	F =	546			30g	F =	555		
	I =	540				I =	569		
40g	F =	620			40g	F =	609		
	I =	622				I =	628		
50g	F =	678			50g	F =	662		
	I =	681				I =	688		
<b>15 MIN.</b> 70g	F =	738			<b>15 MIN.</b> 70g	F =	756		
	I =	738				I =	776		
90g	F =	792			90g	F =	821		
	I =	789				I =	820		
<b>10 MIN.</b> 100g	F =	807			<b>10 MIN.</b> 100g	F =	839		
	I =	801				I =	836		
<b>OBSERVAÇÕES:</b> "F" representa a defasagem entra as amostra de tensão "V" e corrente "I" após a saída do CI MPY634 com ganho 1,5V/V e "I" representa o pico da amplitude de corrente.									

V =const.	AMOSTRA		DATA		V =const.	AMOSTRA		DATA	
	3					4			
<b>SECO</b>	F =	233	Temp. inicial		<b>SECO</b>	F =	240	Temp. inicial	
	I =	364	25,6 °C			I =	369	29,6 °C	
<b>5 MIN.</b>	F =	252			<b>5 MIN.</b>	F =	246		
<b>1g</b>	I =	375			<b>1g</b>	I =	376		
<b>2g</b>	F =	264	<del>Temp. final</del>		<b>2g</b>	F =	269	<del>Temp. final</del>	
	I =	376	25,5 °C			I =	387	xx,x °C	
<b>3g</b>	F =	292			<b>3g</b>	F =	294		
	I =	372				I =	389		
<b>4g</b>	F =	313	Peso amostra		<b>4g</b>	F =	319	Peso amostra	
	I =	375	Peso com becker			I =	391	Peso com becker	
<b>8 MIN.</b>	F =	358	115,6 g		<b>8 MIN.</b>	F =	362	115,6 g	
<b>6g</b>	I =	388	360,6 g		<b>6g</b>	I =	407	360,6 g	
<b>8g</b>	F =	398	<del>Hora inicial</del>		<b>8g</b>	F =	400	<del>Hora inicial</del>	
	I =	413	22:15			I =	425	16:45	
<b>10g</b>	F =	433			<b>10g</b>	F =	437		
	I =	449				I =	450		
<b>12g</b>	F =	469	Hora final		<b>12g</b>	F =	469	Hora final	
	I =	483	00:30			I =	481	17:04	
<b>12 MIN.</b>	F =	583			<b>12 MIN.</b>	F =	535		
<b>20g</b>	I =	598			<b>20g</b>	I =	541		
<b>30g</b>	F =	672			<b>30g</b>	F =	587		
	I =	695				I =	595		
<b>40g</b>	F =	734			<b>40g</b>	F =	634		
	I =	757				I =	643		
<b>50g</b>	F =	755			<b>50g</b>	F =	674		
	I =	774				I =	685		
<b>15 MIN.</b>	F =	749			<b>15 MIN.</b>	F =	742		
<b>70g</b>	I =	765			<b>70g</b>	I =	757		
<b>90g</b>	F =	784			<b>90g</b>	F =	832		
	I =	792				I =	843		
<b>10 MIN.</b>	F =	801			<b>10 MIN.</b>	F =	845		
<b>100g</b>	I =	806			<b>100g</b>	I =	852		
<b>OBSERVAÇÕES:</b>									

V =const.	AMOSTRA		DATA		V =const.	AMOSTRA		DATA	
	5		1/2/2010			6		1/2/2010	
<b>SECO</b>	F =	122	Temp. inicial 27,5 °C		<b>SECO</b>	F =	126	Temp. inicial 29,4°	
	I =	128				I =	132		
<b>1g</b>	<b>5 MIN.</b>				<b>1g</b>	<b>5 MIN.</b>			
	F =	133				F =	131		
	I =	138				I =	139		
<b>2g</b>	F =	171	<b>Temp. final</b> 28,5 °C		<b>2g</b>	F =	175	<b>Temp. final</b>	
	I =	149				I =	150		
<b>3g</b>	F =	200			<b>3g</b>	F =	221		
	I =	165				I =	172		
<b>4g</b>	F =	229	Peso amostra Peso com becker		<b>4g</b>	F =	255	Peso amos. com becker	
	I =	182				I =	195		
<b>6g</b>	<b>8 MIN.</b>		115,6 g 360,6 g		<b>6g</b>	<b>8 MIN.</b>		375,6	
	F =	288				F =	327		
	I =	231				I =	261		
<b>8g</b>	F =	343	<b>Hora inicial</b> 10:40		<b>8g</b>	F =	385	<b>Hora inicial</b> 15:30	
	I =	287				I =	326		
<b>10g</b>	F =	396			<b>10g</b>	F =	431		
	I =	347				I =	381		
<b>12g</b>	F =	435	Hora final 13:01		<b>12g</b>	F =	475	Hora final	
	I =	392				I =	436		
<b>20g</b>	<b>12 MIN.</b>				<b>20g</b>	<b>12 MIN.</b>			
	F =	525				F =	550		
	I =	500				I =	533		
<b>30g</b>	F =	603			<b>30g</b>	F =	626		
	I =	593				I =	623		
<b>40g</b>	F =	653			<b>40g</b>	F =	684		
	I =	650				I =	679		
<b>50g</b>	F =	700			<b>50g</b>	F =	720		
	I =	705				I =	719		
<b>70g</b>	<b>15 MIN.</b>				<b>70g</b>	<b>15 MIN.</b>			
	F =	727				F =	772		
	I =	724				I =	768		
<b>90g</b>	F =	780			<b>90g</b>	F =	814		
	I =	772				I =	799		
<b>100g</b>	<b>10 MIN.</b>				<b>100g</b>	<b>10 MIN.</b>			
	F =	794				F =			
	I =	781				I =			
<b>OBSERVAÇÕES:</b> Amostra 6 descartada devido a erros no preenchimento tabela.									

V =const.	AMOSTRA		DATA		V =const.	AMOSTRA		DATA	
	7		1/2/2010			8		2/2/2010	
<b>SECO</b>	F =	126	Temp. inicial 29,2°C		<b>SECO</b>	F =	126	Temp. inicial 28,8 °C	
	I =	133				I =	134		
<b>1g</b>	<b>5 MIN.</b>				<b>1g</b>	<b>5 MIN.</b>			
	F =	142				F =	133		
	I =	138				I =	142		
<b>2g</b>	F =	168	<b>Temp. final</b> 29,5 °C		<b>2g</b>	F =	146	<b>Temp. final</b> 27,6 °C	
	I =	150				I =	151		
<b>3g</b>	F =	205			<b>3g</b>	F =	206		
	I =	179				I =	165		
<b>4g</b>	F =	243	Peso amostra Peso com becker		<b>4g</b>	F =	251	Peso amostra Peso com becker	
	I =	207				I =	198		
<b>6g</b>	<b>8 MIN.</b>		115,6 g 360,6 g		<b>6g</b>	<b>8 MIN.</b>		115,6 g 360,6 g	
	F =	311				F =	326		
	I =	255				I =	261		
<b>8g</b>	F =	374	<b>Hora inicial</b> 20:35		<b>8g</b>	F =	388	<b>Hora inicial</b> 00:00	
	I =	326				I =	323		
<b>10g</b>	F =	431			<b>10g</b>	F =	439		
	I =	394				I =	395		
<b>12g</b>	F =	477	Hora final 22:57		<b>12g</b>	F =	485	Hora final 02:44	
	I =	450				I =	460		
<b>20g</b>	<b>12 MIN.</b>				<b>20g</b>	<b>15 MIN.</b>			
	F =	594				F =	571		
	I =	598				I =	578		
<b>30g</b>	F =	715			<b>30g</b>	F =	646		
	I =	735				I =	674		
<b>40g</b>	F =	759			<b>40g</b>	F =	720		
	I =	771				I =	757		
<b>50g</b>	F =	736			<b>50g</b>	F =	780		
	I =	751				I =	816		
<b>70g</b>	<b>15 MIN.</b>				<b>70g</b>	<b>18 MIN.</b>			
	F =	752				F =	844		
	I =	750				I =	860		
<b>90g</b>	F =	832			<b>90g</b>	F =	928		
	I =	808				I =	909		
<b>100g</b>	<b>10 MIN.</b>				<b>100g</b>	<b>15 MIN.</b>			
	F =	844				F =	955		
	I =	813				I =	906		
<b>OBSERVAÇÕES:</b>									

V =const.	AMOSTRA		DATA	V =const.	AMOSTRA		DATA
	9		2/2/2010		10		3/2/2010
<b>SECO</b>	F =	125	Temp. inicial 28,8°C	<b>SECO</b>	F =	126	Temp. inicial 30,5°C
	I =	131			I =	133	
<b>5 MIN.</b> 1g	F =	128		<b>5 MIN.</b> 1g	F =	134	
	I =	135			I =	140	
<b>2g</b>	F =	152	<b>Temp. final</b> Xx,x °C	<b>2g</b>	F =	157	<b>Temp. final</b> Xx,x °C
	I =	138			I =	141	
<b>3g</b>	F =	187		<b>3g</b>	F =	186	
	I =	156			I =	151	
<b>4g</b>	F =	224	Peso amostra Peso com becker	<b>4g</b>	F =	227	Peso amostra Peso com becker
	I =	179			I =	174	
<b>8 MIN.</b> 6g	F =	290	115,4 g 360,2 g	<b>8 MIN.</b> 6g	F =	293	115,4 g 360,4 g
	I =	231			I =	223	
<b>8g</b>	F =	346	<b>Hora inicial</b> 03:40	<b>8g</b>	F =	345	<b>Hora inicial</b> 00:35
	I =	286			I =	275	
<b>10g</b>	F =	399		<b>10g</b>	F =	386	
	I =	361			I =	322	
<b>12g</b>	F =	458	Hora final	<b>12g</b>	F =	429	Hora final 03:19
	I =	439			I =	371	
<b>12 MIN.</b> 20g	F =	569		<b>12 MIN.</b> 20g	F =	498	
	I =	589			I =	461	
<b>30g</b>	F =	662		<b>30g</b>	F =	564	
	I =	706			I =	543	
<b>40g</b>	F =	711		<b>40g</b>	F =	651	
	I =	756			I =	650	
<b>50g</b>	F =	741		<b>50g</b>	F =	714	
	I =	778			I =	717	
<b>15 MIN.</b> 70g	F =	780		<b>15 MIN.</b> 70g	F =	800	
	I =	803			I =	800	
<b>90g</b>	F =	870		<b>90g</b>	F =	864	
	I =	868			I =	849	
<b>10 MIN.</b> 100g	F =	900		<b>10 MIN.</b> 100g	F =	889	
	I =	883			I =	860	
<b>OBSERVAÇÕES:</b>							



V = const	AMOSTRA		DATA		V = const	AMOSTRA		DATA	
	11		5/2/2010			12		7/2/2010	
<b>SECO</b>	F =	143	Temp. inicial 31,5 °C		<b>SECO</b>	F =	146	Temp. inicial 33,5 °C	
	I =	159				I =	164		
<b>5 MIN.</b> 1g	F =	150			<b>5 MIN.</b> 1g	F =	153		
	I =	169				I =	174		
<b>2g</b>	F =	191	<b>Temp. final</b> 30,6 °C		<b>2g</b>	F =	200	<b>Temp. final</b> 33,2 °C	
	I =	170				I =	178		
<b>3g</b>	F =	213			<b>3g</b>	F =	240		
	I =	178				I =	194		
<b>4g</b>	F =	249	Peso amostra Peso com becker		<b>4g</b>	F =	283	Peso amostra Peso com becker	
	I =	196				I =	219		
<b>8 MIN.</b> 6g	F =	302	115,6 g 360,6 g		<b>8 MIN.</b> 6g	F =	344	115,6 g 360,6 g	
	I =	232				I =	267		
<b>8g</b>	F =	367	<b>Hora inicial</b> 21:50		<b>8g</b>	F =	407	<b>Hora inicial</b> 15:10	
	I =	286				I =	328		
<b>10g</b>	F =	412			<b>10g</b>	F =	457		
	I =	332				I =	383		
<b>12g</b>	F =	457	Hora final 00:36		<b>12g</b>	F =	501	Hora final 17:55	
	I =	381				I =	432		
<b>12 MIN.</b> 20g	F =	551			<b>12 MIN.</b> 20g	F =	573		
	I =	493				I =	513		
<b>30g</b>	F =	624			<b>30g</b>	F =	646		
	I =	576				I =	597		
<b>40g</b>	F =	0			<b>40g</b>	F =	737		
	I =	0				I =	687		
<b>50g</b>	F =	786			<b>50g</b>	F =	806		
	I =	747				I =	746		
<b>15 MIN.</b> 70g	F =	898			<b>15 MIN.</b> 70g	F =	945		
	I =	841				I =	841		
<b>90g</b>	F =	962			<b>90g</b>	F =	1017		
	I =	891				I =	880		
<b>10 MIN.</b> 100g	F =	991			<b>10 MIN.</b> 100g	F =	1043		
	I =	896				I =	890		
<b>OBSERVAÇÕES:</b>									

V =	AMOSTRA	DATA		V =	AMOSTRA	DATA	
	13	8/2/2010					
<b>SECO</b>	F = 147 I = 175	Temp. inicial 41,0 °C		<b>SECO</b>	F = 0 I = 0	Temp. inicial	
<b>5 MIN.</b> 1g	F = 155 I = 173			<b>5 MIN.</b> 1g	F = 0 I = 0		
2g	F = 161 I = 173	<b>Temp. final</b> 38,8 °C		2g	F = 0 I = 0	<b>Temp. final</b>	
3g	F = 198 I = 180			3g	F = 0 I = 0		
4g	F = 251 I = 204	Peso amostra Peso com becker		4g	F = 0 I = 0	Peso amostra Peso com becker	
<b>8 MIN.</b> 6g	F = 329 I = 259	115,6 g 360,6 g		<b>8 MIN.</b> 6g	F = 0 I = 0		
8g	F = 408 I = 332	<b>Hora inicial</b> 23:00		8g	F = 0 I = 0	<b>Hora inicial</b>	
10g	F = 460 I = 391			10g	F = 0 I = 0		
12g	F = I =	Hora final 01:45		12g	F = 0 I = 0	Hora final	
<b>12 MIN.</b> 20g	F = 622 I = 570			<b>15 MIN.</b> 20g	F = 0 I = 0		
30g	F = 731 I = 684			30g	F = 0 I = 0		
40g	F = 785 I = 742			40g	F = 0 I = 0		
50g	F = 824 I = 772			50g	F = 0 I = 0		
<b>15 MIN.</b> 70g	F = 894 I = 821			<b>18 MIN.</b> 70g	F = 0 I = 0		
90g	F = 963 I = 855			90g	F = 0 I = 0		
<b>10 MIN.</b> 100g	F = 12288 I = 868			<b>15 MIN.</b> 100g	F = 0 I = 0		
<b>OBSERVAÇÕES:</b> Amostra 13 realizada com temperatura elevada em 10 °C em relação às amostras anteriores para visualização dos efeitos da temperatura sobre a variação da fase da impedância.							

V =	AMOSTRA	DATA		V =	AMOSTRA	DATA	
	14	9/2/2010			15	9/2/2010	
<b>SECO</b>	F = 140 I = 157	Temp. inicial 27,5°		<b>SECO</b>	F = 140 I = 157	Temp. inicial 27,6°	
<b>1g</b> 5 MIN.	F = 0 I = 0			<b>1g</b> 5 MIN.	F = 154 I = 165		
<b>2g</b>	F = 0 I = 0	Temp. final		<b>2g</b>	F = 191 I = 170	Temp. final 26,1°	
<b>3g</b>	F = 0 I = 0			<b>3g</b>	F = 211 I = 179		
<b>4g</b>	F = 0 I = 0	Peso amos. com becker		<b>4g</b>	F = 231 I = 189	Peso amos. com becker	
<b>6g</b> 8 MIN.	F = 0 I = 0	115,6g 360,6g		<b>6g</b> 8 MIN.	F = 287 I = 226	410 g 655,0g	
<b>8g</b>	F = 0 I = 0	Hora inicial 23:30		<b>8g</b>	F = 312 I = 247	Hora inicial 23:45	
<b>10g</b>	F = 0 I = 0			<b>10g</b>	F = 351 I = 280		
<b>12g</b>	F = 0 I = 0	Hora final		<b>12g</b>	F = 384 I = 315	Hora final 02:30	
<b>20g</b> 12 MIN.	F = 0 I = 0			<b>20g</b> 12 MIN.	F = 430 I = 363		
<b>30g</b>	F = 0 I = 0			<b>30g</b>	F = 518 I = 461		
<b>40g</b>	F = 0 I = 0			<b>40g</b>	F = 610 I = 572		
<b>50g</b>	F = 0 I = 0			<b>50g</b>	F = 698 I = 669		
<b>70g</b> 15 MIN.	F = 0 I = 0			<b>70g</b> 15 MIN.	F = 852 I = 807		
<b>90g</b>	F = 0 I = 0			<b>90g</b>	F = 904 I = 829		
<b>100g</b> 10 MIN.	F = 0 I = 0			<b>100g</b> 10 MIN.	F = 917 I = 832		

**OBSERVAÇÕES:**

Amostra 15: Solo com calcário dolomítico tipo D. 312g de solo com 98g de calcário

Foi inserido um total de 410g, de forma a obter altura do conteúdo de solo dentro do *becker* compatível com as amostras anteriores, ficando a parte metalizada do sensor de placas paralelas totalmente inserido no solo.

Amostra 14: não realizada devido a erros no início do processo de medição.