

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

**Sistema microcontrolado para monitoramento de nível de água de lençol
freático através de sensor capacitivo**

Aluno: Antonio Nogueira Starling
Orientador: Clemente José Gusmão Carneiro da Silva

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

ANTONIO NOGUEIRA STARLING

**SISTEMA MICROCONTROLADO PARA MONITORAMENTO DE NÍVEL DE ÁGUA
DE LENÇOL FREÁTICO ATRAVÉS DE SENSOR CAPACITIVO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área:

Aplicações das Radiações, Radioproteção e Instrumentação Nuclear

Orientador:

Clemente José Gusmão Carneiro da Silva

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2008

Este trabalho é dedicado a meus pais, irmãos, esposa e filhos que foram os alimentadores de meu ânimo para realizá-lo.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. orientador Dr. Clemente José Gusmão Carneiro da Silva, pela confiança e boa vontade em simplificar empecilhos.

Ao Prof. e colega de trabalho Msc. John Kennedy Schettino de Souza pelas orientações na utilização de microcontroladores.

Ao Prof. e colega de trabalho Msc. Francisco Ermelindo Magalhães pelas orientações referentes a processos de calibração de instrumentos e empréstimo de materiais para consulta.

Ao Prof. e colega de trabalho Msc. Marco Antonio da Silva Pinto pela ajuda na confecção das placas de circuito impresso necessárias.

Ao Prof. e colega de trabalho Msc. João Cláudio de Menezes Scotti que na qualidade de coordenador dos laboratórios do curso técnico de Eletrônica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG permitiu-me o uso de suas instalações e equipamentos sem restrições.

A minha esposa Roseli e meus filhos Bernardo e Guilherme que com bastante desprendimento deram-me tranquilidade para me dedicar ao trabalho.

A meus pais e irmãos pelo apoio e incentivo constantes.

RESUMO

Este estudo foi direcionado para o desenvolvimento de um sistema para medir e registrar, em intervalos de tempo predeterminados, o nível de água em um reservatório. O sistema é composto por um sensor feito com um fio esmaltado de cobre e um circuito eletrônico microcontrolado. Determinou-se, através de ensaios de repetitividade, a incerteza de medição do sistema e sua qualidade de resposta. Nestes ensaios a resposta do sistema foi analisada em termos de número de pulsos por variação de deslocamento da superfície do líquido em comparação à leituras de deslocamento feitas em um visor transparente, que serviu como referência de calibração. O sistema mostrou-se viável como ferramenta de baixo custo para monitoramento de nível de água apresentando, na faixa de trabalho estudada, característica de resposta linear e boa repetitividade.

ABSTRACT

A system was developed to measure and to register reservoir water levels in predetermined time intervals. The system was composed by an enamelled copper wire sensor and a microcontrolled electronic circuit. Uncertainty determination of these level measurements and its reproducibility were obtained through several assays. This reproducibility was analyzed in terms of number of pulses using the copper wire sensor and a transparent viewfinder for direct level measurements that served as calibration reference. The system was presented viable as tool of low cost for water level measurements. In the range of levels used the system presented a linear behavior also a good reproducibility.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1	Importância das águas subterrâneas	3
2.2	O movimento da água no sistema formado por atmosfera, solo e plantas	4
2.3	Consumo de água na agricultura e evapotranspiração	5
2.4	Balanço hídrico	6
2.5	Poços de observação e densidade de medição	7
2.6	Equipamentos para medição de nível de água em lençol freático.	8
2.6.1	Fita e régua linimétrica	9
2.6.2	Linígrafo	10
2.6.3	Medição pelo princípio da pressão hidrostática	11
2.6.3.1	Sensores piezoelétricos e piezoresistivos	12
2.6.3.2	Sensores de arame vibrado	12
2.6.3.3	Sensores de borbulhamento de ar ou gás	13
2.6.4	Medição por ultra-som	14
2.6.5	Medição por ondas eletromagnéticas	14
2.6.6	Medição por capacitância	17
2.6.6.1	Sensores capacitivos de dielétrico variável	17
2.6.6.2	Sensores capacitivos de área variável	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1	Reservatório	21
3.2	Sensor	22
3.3	Módulo eletrônico	25
3.4	Princípio de funcionamento do sensor	27
3.5	Princípio de medição de capacitância usado no sistema	27
3.5.1	Medição do tempo de descarga do capacitor	29
3.6	Funcionamento do sistema	30
3.6.1	Funcionamento principal	30
3.6.2	Tratamento da solicitação de leitura	31
3.6.3	Tratamento da solicitação de transferência	33
3.7	Tratamento estatístico das medidas	34
3.7.1	O teorema central do limite	34
3.7.2	A distribuição normal	35
3.7.3	A incerteza da medição	37
3.8	Ensaio de calibração do sistema	37
3.8.1	Medição da capacitância do sensor em função do nível de água	38
3.8.2	Ensaio de repetitividade do sistema	39
4	Resultados e discussões	40
4.1	Ensaio para verificação da capacitância do sensor	40
4.1.1	Análise dos resultados de linearidade e repetitividade do sensor	41

4.2	Ensaio de repetitividade do sistema	41
4.2.1	Ensaio de repetitividade para o nível 0	42
4.2.2	Ensaio de repetitividade para o nível 74mm	43
4.2.3	Ensaio de repetitividade para o nível 148mm	44
4.2.4	Ensaio de repetitividade para o nível 222mm	45
4.2.5	Ensaio de repetitividade para o nível 296mm	46
4.2.6	Resumo dos resultados e análise da resposta do sistema em relação às médias das medidas dos ensaios de repetitividade	47
4.3	Ensaio de estabilidade do sistema em intervalos de tempo entre leituras elevados	48
4.3.1	Ensaio para medições no nível 0 com intervalo entre leituras de 1800 segundos	48
4.3.2	Ensaio para medições no nível 296mm com intervalo entre leituras de 200 segundos	49
4.3.3	Análise da resposta do sistema para leituras em intervalos de tempo elevados	50
5	CONCLUSÕES	52
6	PERSPECTIVAS	53
7	BIBLIOGRAFIA	54
APÊNDICE A	ESQUEMA ELETRÔNICO DO CIRCUITO	57
APÊNDICE B	ANÁLISE DA AUTONOMIA DO SISTEMA	58
APÊNDICE C	PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Consumo anual de água no mundo segundo áreas de atividades	3
Figura 2.2	Modelo simplificado do balanço hídrico de uma determinada área	6
Figura 2.3	Poço de observação para verificação do nível do lençol	8
Figura 2.4	Fitas linimétricas comerciais.....	9
Figura 2.5	Linígrafo eletrônico.....	10
Figura 2.6	Pressão hidrostática sobre o ponto A	11
Figura 2.7	Sonda de medição de nível usando transdutor de arame vibrado .	13
Figura 2.8	Medição de nível por bobulamento de ar ou gás	14
Figura 2.9	Modelo de medição de nível por reflexão de ondas de ultra-som ou eletromagnéticas.....	14
Figura 2.10.	Capacitores planos e cilíndricos	16
Figura 2.11	Capacitores de placas paralelas e cilíndricos de dielétricos variáveis.....	17
Figura 2.12	Capacitor de Mendes Sobrinho	19
Figura 3.1	Detalhes construtivos do reservatório	21
Figura 3.2	Fotografia do reservatório	22
Figura 3.3	Detalhes construtivos do sensor	23
Figura 3.4	Fotografia do sensor	23
Figura 3.5	Detalhe de posicionamento do sensor dentro do reservatório	24
Figura 3.6	Fotografia do posicionamento do sensor no reservatório	24
Figura 3.7	Diagrama em blocos do sistema.de medição de nível	25
Figura 3.8	Fotografia do circuito eletrônico montado em <i>proto-on-board</i>	26
Figura 3.9	Fotografia da interligação do sensor à unidade eletrônica	26
Figura 3.10	Malha resistiva para carga e descarga de um capacitor	28
Figura 3.11	Circuito utilizado para contagem de tempo	29
Figura 3.12	Unidades eletrônicas implementadas no sistema.....	30
Figura 3.13	Algoritmo do funcionamento principal do sistema.....	31
Figura 3.14	Algoritmo da solicitação de leitura	32
Figura 3.15	Algoritmo da operação de transferência de dados	33
Figura 3.16	Exemplo da distribuição normal	36
Figura 3.17	Faixa de trabalho e pontos de referência para calibração.....	38
Figura 4.1	4.1. Capacitância de saída do sensor em função do nível de água	40
Figura 4.2	Figura 4.2. Curva de probabilidades dos pulsos totalizados no nível 0	42
Figura 4.3	Histograma dos pulsos totalizados no nível 0	42
Figura 4.4	Curva de probabilidades dos pulsos totalizados no nível 74mm...	43
Figura 4.5	Histograma dos pulsos totalizados no nível 74mm	43
Figura 4.6	Curva de probabilidades dos pulsos totalizados no nível 148mm.	44
Figura 4.7	Histograma dos pulsos totalizados no nível 148mm	44
Figura 4.8	Curva de probabilidades dos pulsos totalizados no nível 222mm.	45
Figura 4.9	Histograma dos pulsos totalizados no nível 222mm	45
Figura 4.10	Curva de probabilidades dos pulsos totalizados no nível 296mm.	46
Figura 4.11	Histograma dos pulsos totalizados no nível 296mm	46
Figura 4.12	Curva resposta das médias dos pulsos totalizados em função de cada nível	47

Figura 4.13	Curva de probabilidades para contagens feitas no nível mínimo em intervalos de 1800 segundos	48
Figura 4.14	Histograma para contagens feitas na cota mínima em intervalos de 1800 segundos	49
Figura 4.15	Curva de probabilidades para contagens feitas no nível máximo em intervalos de 200 segundos	50
Figura 4.16	Histograma para contagens feitas no nível máximo em intervalos de 200 segundos	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Ensaio inicial para analisar a capacitância do sensor em função do nível d'água	40
Tabela 4.2	Pulsos totalizados pelo sistema no nível 0	42
Tabela 4.3	Pulsos totalizados pelo sistema no nível 74mm	43
Tabela 4.4	Pulsos totalizados pelo sistema no nível 148mm	44
Tabela 4.5	Pulsos totalizados pelo sistema no nível 222mm.....	45
Tabela 4.6	Pulsos totalizados pelo sistema no nível 292mm.....	46
Tabela 4.7	Resumo das médias das contagens de pulsos	47
Tabela 4.8	Quantidade de pulsos contados pelo sistema no nível mínimo em intervalos 1800 segundos entre leituras.....	48
Tabela 4.9	Quantidade de pulsos contados pelo sistema no nível máximo com intervalo de 200 segundos entre leituras	49
Tabela 4.10	Comparação entre ensaios de repetitividade para os níveis mínimo e máximo	51

1 INTRODUÇÃO

Nível de água é a distância que a superfície deste líquido fica em relação a uma referência. A medição desta grandeza física é atividade antiga havendo registro de que os egípcios já a realizavam há 3000 anos AC para fins agrícolas durante as cheias do rio Nilo (CARVALHO,1987). Ao longo do tempo o desenvolvimento tecnológico fez surgir várias técnicas para esta finalidade apoiadas em princípios físicos como empuxo de bóias, pressão hidrostática, ressonância de dutos metálicos submersos, reflexão de ondas de ultra-som, reflexão de ondas eletromagnéticas, atenuação de feixes de radiação, variação de capacitância, variação de resistência elétrica, borbulhamento de ar e reflexão ótica. O desenvolvimento da indústria de componentes eletrônicos gerou sensores e circuitos integrados que permitiram a transformação desta grandeza em sinais elétricos e, também, o processamento, armazenamento e transmissão desses sinais com relativa facilidade e baixo custo.

Culturas vegetais de sistema radicular profundo utiliza água do lençol freático. O estudo da variação do nível deste reservatório natural deve ser realizado em vários locais distribuídos ao longo da cultura pois os pontos de enchimento (recarga) e esvaziamento (descarga) do lençol, a topografia e morfologia do solo e o tipo, estágio de desenvolvimento e densidade da cultura não são uniformemente distribuídos no espaço. Devido às particularidades de localização os equipamentos usados nesta atividade devem apresentar pequeno consumo de energia, elevada autonomia de funcionamento através de baterias, facilidade de transporte e operação, capacidade de realizar medições automaticamente e de armazenar dados. Existem equipamentos comerciais de diversos fabricantes que contemplam estas características, porém, a necessidade de se ter vários pontos de

monitoramento operando simultaneamente pode comprometer a viabilidade do estudo em função do custo.

Nesse contexto esse trabalho tem por objetivo mostrar o desenvolvimento de um sistema de medição de nível barato, para possibilitar o monitoramento do nível do lençol freático em aplicações que exigem muitos pontos de medições distribuídos ao longo de uma área operando simultaneamente.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Importância das águas subterrâneas

A água é um dos principais recursos naturais do planeta ocorrendo em oceanos, mares, geleiras, rios, lagos e subsolo com distribuição conforme quadro 2.1 e presença nas mais diversas atividades humanas, como mostra, simplificada, a figura 2.1.

Quadro 2.1. Ocorrência de águas no mundo

Fonte: Shiklomanov em IPH/UNESCO, 1998, adaptado de Rebouças e outros em Águas doces do Brasil, 1999. Citado por Águas Subterrâneas: Programa de Águas Subterrâneas, Ministério do Meio Ambiente, 2001

forma de ocorrência	Volume 10^6 km^3	% do total
Água Salgada - Oceanos	1351,35	97,5
Água doce	34,65	2,5
Calotas polares e geleiras	23,87	1,72
Subterrâneas	10,36	0,75
Rios e lagos	0,10	0,0075
Outros	0,31	0,023
Total	1386	100

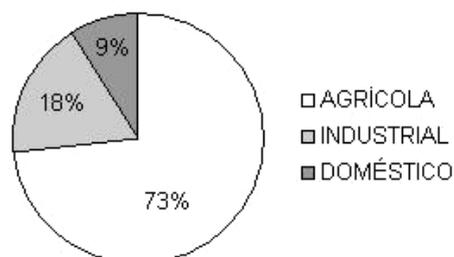


Figura 2.1. Consumo anual de água no mundo segundo áreas de atividades

fonte: Revista Época edição 478; 2007,p.112

A importância das águas subterrâneas é clara quando se observa que ela é do tipo doce, sendo mais apropriada as atividades humanas, e mais abundante que as superficiais.

De toda a água doce disponível para consumo 96% é proveniente de água subterrânea. No Brasil, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE (2000), cerca de 55% dos distritos são alimentados com água subterrânea. Além de atender diretamente à população estes recursos são usados na indústria, na agricultura (irrigação), lazer, etc. (Ministério do Meio Ambiente–MMA, 2007),

Segundo o MMA (2001) os reservatórios subterrâneos brasileiros abastecem rios e lagos tornando-os perenes na época de seca, apresentam funções estratégicas como produção, armazenamento, transporte, regularização, filtragem, auto-depuração e energia, são destinados a múltiplos usos e tem importante alcance social, servindo como fonte de água potável para boa parte da população.

Ainda como exemplo, em 1998, 76,6% da população do Maranhão, 84,3% do Piauí, 20% do Recife e 50% das indústrias de São Paulo se abasteciam de poços subterrâneos (MMA, 1998).

A monitoração do volume de água dos aquíferos se torna importante, uma vez que sua disponibilidade afeta diretamente o meio ambiente. A fragilidade na exploração deste recurso está na reposição da água dos aquíferos que, se não ocorrer na mesma proporção da retirada, pode levar o sistema à exaustão (MANZIONE, 2007).

2.2 O movimento da água no sistema formado por atmosfera, solo e plantas

A água se apresenta em várias fases físicas e aparece em diversos lugares, na superfície, dentro ou sobre o planeta se movimentando continuamente entre as

fases e os locais e mantendo-se constante em sua totalidade (PORTO,1986). Em um sistema composto por atmosfera, solo e plantas a água presente no ar na forma de vapor, sob determinadas condições, se precipita para o solo como chuva, granizo ou neve. No solo uma parte se infiltra e outra escoia superficialmente em direção a canais. A água que infiltra movimenta-se através dos vazios existentes (percola) formando os lençóis subterrâneos, que podem interceptar uma vertente e voltar à superfície ou se encaminhar para locais entre camadas impermeáveis formando os lençóis artesianos. As plantas atuam no sistema retirando a umidade do solo e a enviando à atmosfera em forma de vapor no processo de transpiração. A superfície do solo também devolve água à atmosfera na forma de evaporação (BARTH,1998).

2.3 Consumo de água na agricultura e evapotranspiração

A agricultura é uma grande consumidora de água, tanto pela retirada para irrigação quanto pelo processo de transpiração. A água é essencial ao desenvolvimento das plantas e a principal fonte onde elas buscam este recurso é a subterrânea, ou seja, a preservada no solo (MARCELINO, 2005).

O consumo de água de uma cultura depende de sua fase de crescimento e se relaciona com dois fatores, a transpiração das folhas e a evaporação do solo. À combinação desses dois fatores dá-se o nome de evapotranspiração, que significa a quantidade de água que deve ser fornecida à cultura para que ela apresente o máximo vigor e produtividade (Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC,2007).

Segundo Lima (1976) o conhecimento do consumo de água de coberturas florestais é importante mas a quantificação desta fase do ciclo hidrológico é muito

difícil e, citando WARD (1971), sugere a utilização do balanço hídrico para medir a evapotranspiração.

2.4 Balanço hídrico

De modo geral a quantidade de água presente no solo em uma unidade de área pode ser estudada pelo balanço hídrico, que pode ser apresentado, simplificada, como o modelo de armazenamentos mostrado na figura 2.2. A equação 2.1 mostra que os principais componentes naturais de entrada e saída deste modelo são a precipitação, a evapotranspiração, e os deslocamentos de água no solo, uma vez que variáveis como uso e armazenamentos temporários, em uma média de longo tempo podem ser considerados constantes (PORTO, 1986).

Segundo a mesma fonte o balanço hídrico pode ser usado, juntamente com outros dados, para estimar a magnitude e a distribuição de variáveis hidrológicas no tempo e fornecer importantes informações sobre variáveis ambientais.

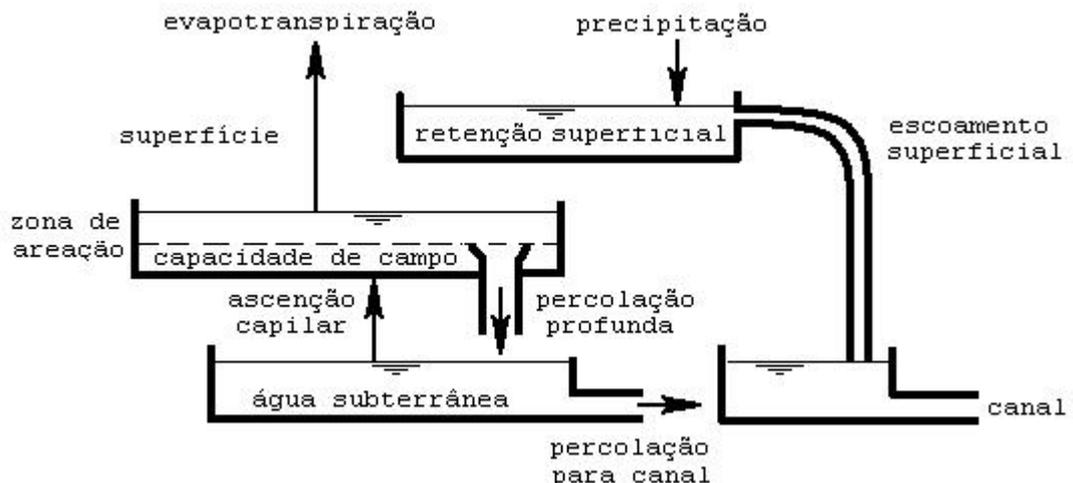


Figura 2.2. Modelo simplificado do balanço hídrico de uma determinada área

$$P = E + D + R + U \quad (2.1)$$

P: Precipitação

E: Evapotranspiração

D: Escoamento superficial e subterrâneo;

R: Armazenamento temporário de água no solo;

U: Utilização

Precipitação, infiltração, evaporação e profundidade do lençol freático são algumas das variáveis hidrológicas que podem ser obtidas pela medição do nível de água. Essas variáveis são amplamente utilizadas em várias áreas das ciências ambientais. O conhecimento destas variáveis em função do tempo é, também, utilizado para validar modelos de transferência de água e solutos no perfil de solo (CARNEIRO,1997).

2.5 Poços de observação e densidade de medição

Lençol freático é o armazenamento de água entre os grânulos do solo e fissuras de rochas à pressão atmosférica (Associação Brasileira de Águas Subterrâneas-ABAS,2007). Seu nível pode ser medido, de maneira convencional, inserindo dispositivos de medição em poços de observação (figura 2.3), onde a água se deposita em função do fluxo que ocorre pela permeabilidade de suas paredes até atingir um nível determinado pela carga hidráulica do local.

A quantidade de água guardada no solo pode variar em função de efeitos espaciais, relacionados à capacidade de absorção e retenção de água (classe de solos, textura e infiltração), efeitos temporais relacionados a clima (pluviometria e evapotranspiração) e, ainda, pela própria utilização da água (MANZIONE,2007). Assim, recomenda-se a utilização de vários pontos de medição de nível distribuídos ao longo da área e a monitoração ao longo do tempo.

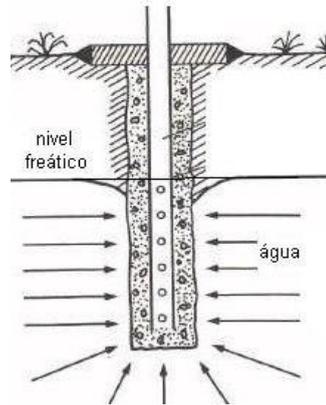


Figura 2.3. Poço de observação para verificação do nível do lençol

2.6 Equipamentos para medição de nível de água em lençol freático

Nível de água em reservatórios subterrâneos despressurizados, como é o caso do lençol freático, é uma variável física vinculada à distância que o espelho d'água se encontra em relação a uma posição de referência na superfície. Segundo Carvalho (1996) esta medição pode ser realizada de forma direta, na qual a medida é mostrada diretamente sobre a parcela umidificada de uma régua graduada mergulhada no poço de observação ou por arranjo mecânico de uma bóia que flutua sobre o líquido e movimenta um indicador sobre uma escala, ou de forma indireta, na qual as medições são apoiadas em transdutores cujos sinais de saída são imagens de grandezas físicas que se relacionam com o nível mas são distintas desse. Nesta categoria incluem-se os sensores que trabalham com pressão hidrostática, ondas de ultra-som, ondas eletromagnéticas, variação de feixes de luz, variação de feixes de radiação e variação de grandezas elétricas como capacitância e resistência.

2.6.1 Fita e régua Linimétrica

O método de medição mais simples consiste em inserir uma fita, ou uma régua, graduada no poço até sua extremidade tocar a água (figura 2.4). O nível é conhecido pela leitura da diferença entre a parcela da fita que fica seca e a parcela que fica umedecida quando da sua retirada do poço. É o método mais barato e difundido, porém, traz inconvenientes como deslocamento de pessoal, erros humanos nos momentos da leitura e do posicionamento do sensor no processo e não permite a automatização das medições.

Uma melhoria nesse método é conseguida acrescentando um sensor elétrico à ponta da fita de modo que uma sinalização é acionada quando, durante a inserção da fita no poço, ele toca a superfície do líquido. O nível é conhecido pela leitura da escala graduada no corpo do equipamento em referência a uma marca na boca do poço. Essa melhoria traz a vantagem de diminuir o erro de posicionamento, porém não resolve as limitações de automatização e presença do operador.

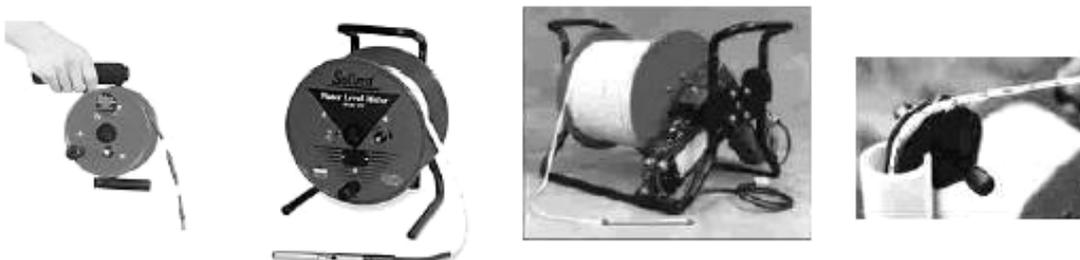


Figura 2.4. Fitas linimétricas comerciais

Fonte: catálogo AG-Solve, 2006

2.6.2 Linígrafo

Usa o princípio do empuxo onde uma bóia flutua sobre o líquido. Ligado à bóia e comunicando-se com a superfície, existe um arranjo mecânico que movimenta um registrador de papel. É um método de medição que apresenta a vantagem de registrar, automática e continuamente, a posição do nível do lençol, porém, exige um sistema mecânico relativamente complexo cuja movimentação deve ocorrer sem atritos quaisquer com as partes fixas do conjunto ou paredes do poço.

Rabello (1992) desenvolveu um linígrafo substituindo o registrador de papel por um sistema eletrônico. No seu equipamento o deslocamento da bóia girava um disco ótico que gerava pulsos elétricos que se comportavam como imagem do deslocamento. Esses pulsos eram contados e armazenados em memória. (Figura 2.5). A vantagem deste sistema foi a simplicidade de registro, que migrou do dispositivo mecânico para o digital, diminuindo a necessidade de manutenção, aumentando a economia de papel e permitindo o registro contínuo com menor consumo de energia.

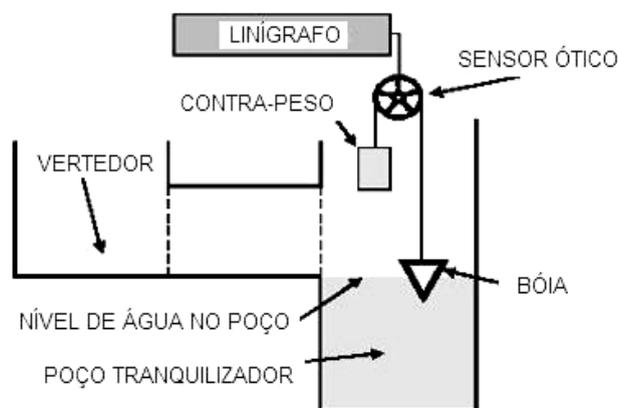


Figura 2.5. Linígrafo eletrônico

2.6.3 Medição pelo princípio da pressão hidrostática

Método de medição indireta apoiado no princípio físico de que a pressão que um líquido faz sobre um corpo nele mergulhado (figura 2.6) é função de sua densidade e da altura da coluna de líquido acima do corpo conforme mostra a equação 2.2 (HALLIDAY,1996). Os cuidados fundamentais com estes sensores é que a densidade do líquido e a pressão externa aplicada ao líquido não podem mudar. Sensores do tipo piezoelétricos e piezoresistivos, arame vibrado, e borbulhamento de ar, são de uso típico neste método de medição.

Existem equipamentos comerciais dedicados à medição de nível de águas subterrâneas onde sensores de pressão hidrostática são inseridos num corpo metálico de proteção que traz, também embutido neste corpo, o circuito eletrônico de condicionamento de sinais e de compensação da variação de temperatura. Estes dispositivos são usados mergulhados na massa de água e se comunicam com a superfície através dos condutores elétricos que os sustentam. Carvalho (1996) comenta que estes tipos de instrumentos foram projetados inicialmente em 1988 pela Siemens usando sensores de pressão absoluta e relativa.

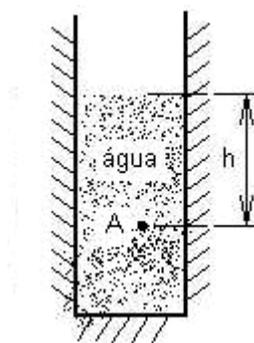


Figura 2.6. Pressão hidrostática sobre o ponto A

$$h = \frac{P}{Dg} \quad (2.2)$$

D = densidade do líquido (kgm^{-3})

g = aceleração da gravidade (ms^{-2})

h = coluna de líquido acima do ponto A (m)

2.6.3.1 Sensores piezoelétricos e piezoresistivos

Alguns cristais semicondutores apresentam a propriedade de gerar sinais elétricos quando força mecânica externa lhe é aplicada. Em função dessa solicitação externa os dispositivos que funcionam com o efeito piezo-elétrico geram uma pequena quantidade de cargas elétricas e os que usam o efeito piezo-resistivo apresentam uma variação em sua resistência elétrica. Os primeiros apresentam pequeno sinal de saída mas excelente estabilidade e os segundos boa sensibilidade mas susceptibilidade à variação da temperatura (FIALHO,2002). Estes materiais são utilizadas pela indústria de componentes na fabricação de sensores que, quando deformados por pressão externa geram sinais elétricos proporcionais à esta grandeza.

2.6.3.2 Sensores de arame vibrado

O princípio de funcionamento desse sensor é baseado na variação da frequência de ressonância de um arame em função da força que o estica. (WERNECK,1996). O metal é levado a vibrar por um oscilador eletrônico e entra em ressonância numa frequência que depende da pressão a que está exposto. Esta frequência é detectada e interpretada como imagem do nível (FIALHO, 2002) Este equipamento é muito robusto mecanicamente e sua saída estável em relação à

variação de temperatura. A figura 2.7 mostra uma sonda comercial de medição de nível de água usando este tipo de sensor.

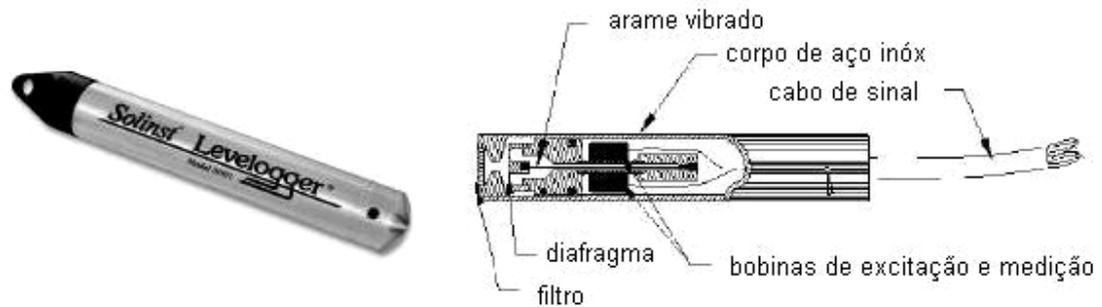


Figura 2.7. Sonda de medição de nível usando transdutor de arame vibrado.

Fonte: Catálogo AG - Solve ,2006

2.6.3.3 Sensores de borbulhamento de ar ou gás

Método que consiste em inserir um tubo de pequeno diâmetro na massa de água até uma determinada posição de referência, colocar um medidor de pressão (manômetro) na extremidade que fica livre na região seca e, numa conexão hidráulica tipo T, alimentar o arranjo com uma fonte de ar comprimido, ou gás inerte, em pressão constante pouco maior que a da camada de líquido sobre a extremidade molhada. O valor indicado no manômetro será proporcional à pressão que o ar faz para sair pela extremidade submersa do tubo em contraposição a pressão da massa de água sobre a extremidade submersa. (CASTRO, 2004).

Este método é imune à variação da temperatura e a ruídos do meio, porém, o peso específico do líquido não pode mudar.

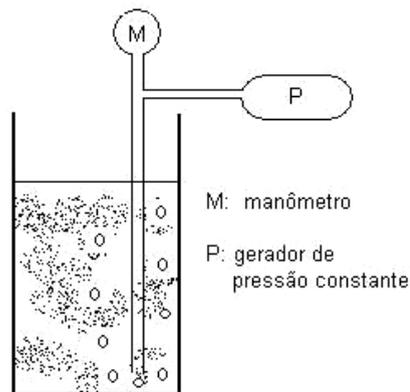


figura 2.8. Medição de nível por borbulhamento de ar ou gás

2.6.4 Medição por ultra-som

Na medição por ultra-som uma onda mecânica entre 20kHz e 200 kHz é enviada por um emissor em direção à superfície do líquido sob estudo que ao ser atingido a reflete em direção a um receptor (figura 2.9). Considerando que para uma frequência específica e um determinado meio de propagação a onda se movimenta com velocidade constante (equação 2.3) a distância entre o ponto de emissão e a superfície refletora é proporcional ao tempo gasto para a onda realizar este trajeto (equação 2.4).

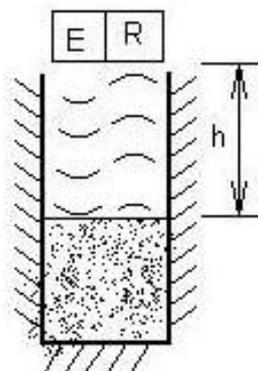


Figura 2.9. Modelo de medição de nível por reflexão de ondas de ultra-som ou eletromagnéticas

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (2.3)$$

v : Velocidade da onda; (ms^{-1})
 B : Módulo volumétrico de elasticidade (Pa)
 ρ : Densidade do meio de propagação (kgm^{-3})

$$h = v.t \quad (2.4)$$

h : Espaço percorrido pela onda (m)
 t : Tempo (s)
 v : Velocidade da onda (ms^{-1})

2.6.5 Medição por ondas eletromagnéticas

Nesse modelo, tal qual no modelo de medidor por ultra-som, a onda eletromagnética é emitida em pulsos e, tão logo encontra material de densidade diferente, se reflete com comprimento de onda alterado (efeito Doppler). O receptor mede o tempo entre a emissão da onda de referência e a recepção da onda com a respectiva modificação em seu comprimento. A distância do emissor à superfície do líquido é imagem do tempo e determinada pela mesma equação 2.4 acima.

$$v = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} c \quad (2.5)$$

v : Velocidade (ms^{-1});
 $\Delta \lambda$: Variação do comprimento entre as ondas emitida e recebida (nm);
 λ : Comprimento da onda emitida (nm);
 c : Velocidade da luz (ms^{-1})

Marcelino (2001) usou um radar de penetração no solo para mapear o topo do lençol freático numa região de transição da floresta amazônica e cerrado e constatou que o topo do lençol variava 1,8 metros em região coberta por floresta permanente, 0,9m em região coberta por floresta manejada e 3,7m em região de

pasto. Além disto, pontuou que, para estudar área de grande extensão este sistema se torna mais viável que o convencional, que usa poços de observação, pois permite uma visão global do topo do lençol enquanto aqueles permitem visões locais.

2.6.6 Medição por capacitância

Estes sensores são feitos aproveitando o princípio físico de movimento de cargas elétricas que ocorre em materiais condutores quando são posicionados próximos entre si, eletricamente isolados e sujeitos a um campo elétrico. Existem dois modelos usuais de capacitores utilizados como sensor, o de placas planas paralelas e o cilíndrico (figura 2.10). Em ambos, o valor da capacitância depende da geometria dos condutores e do material presente entre eles.

As equações 2.6 e 2.7 descrevem respectivamente as capacitâncias de um arranjo plano e de um cilíndrico. Segundo Hayt (2003) elas são válidas quando as dimensões das placas são muito maiores que a distância que as separa, o campo elétrico e a distribuição das cargas são uniformes em todos os pontos não adjacentes às bordas, o efeito destas regiões é desprezível na capacitância final e o dielétrico é uniforme em todo o conjunto.

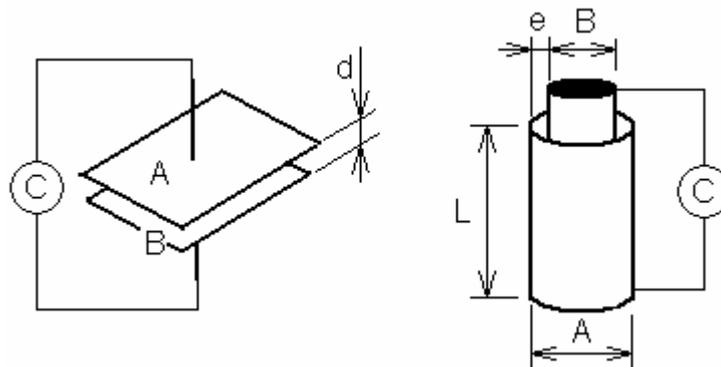


Figura 2.10. Capacitores planos e cilíndricos

$$C_{PP} = \epsilon_0 \epsilon_R \frac{S}{d} \quad (2.6)$$

C_{PP} : Capacitância do arranjo paralelo

ϵ_0 : Permissividade do vácuo ou ar [$8,85 \cdot 10^{-12}$ (Fm⁻¹)

ϵ_R : Constante relativa da permissividade do material dielétrico em relação à permissividade do vácuo;

d : Distância entre as placas paralelas (m);

S : Área das placas paralelas (m²)

$$C_{CC} = 2\pi \epsilon_0 \epsilon_R \frac{L}{\ln \frac{A}{B}} \quad (2.7)$$

C_{CC} : Capacitância do arranjo cilíndrico

L : altura do capacitor cilíndrico (m);

A : raio do casca cilíndrica (m);

B : raio do cilindro interno (m);

2.6.6.1 Sensores capacitivos de dielétrico variável

Nestes modelos a geometria do conjunto é constante e o dielétrico é variável. A figura 2.11 mostra, em corte, um capacitor plano e um cilíndrico construídos de modo que o líquido penetre no espaço entre as placas formando uma região molhada e uma seca. O capacitor do conjunto terá, portanto, dois dielétricos diferentes (água e ar) cujas espessuras dependeram da posição do líquido entre os condutores. Segundo Fialho (2002) a capacitância total será a associação série de capacitores se o arranjo for do tipo placas paralelas (equação 2.8) ou associação paralela se o arranjo for cilíndrico (equação 2.10). Em ambos o nível será determinado como imagem da capacitância total sendo que a equação 2.9 o descreve para o arranjo paralelo e a equação 2.11 para o cilíndrico).

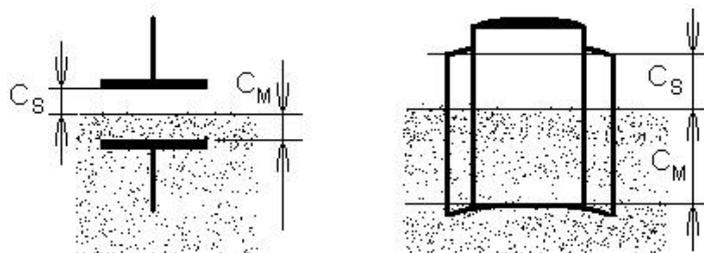


Figura 2.11. Capacitores de placas paralelas e cilíndricos de dielétricos variáveis

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_M} + \frac{1}{C_S} \quad (2.8)$$

$$h = -\left[\frac{\mathbf{e}_R \cdot (-C \cdot d + \mathbf{e}_0 \cdot S)}{C \cdot (\mathbf{e}_R - 1)} \right] \quad (2.9)$$

$$C = C_M + C_S \quad (2.10)$$

$$h = -\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2p\mathbf{e}_0 L - C \ln \frac{A}{B}}{p\mathbf{e}_0 (\mathbf{e}_R - 1)} \right) \quad (2.11)$$

C_M : Capacitância referente à parcela molhada

C_S : Capacitância referente à parcela seca

C : Capacitância total

\mathbf{e}_0 : Permissividade do vácuo ou ar ($8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$)

\mathbf{e}_R : Constante relativa da permissividade do material;

d : Distância entre as placas paralelas (m);

S : Área das placas paralelas (m^2)

A : Diâmetro da casca externa (m)

B : Diâmetro do condutor interno (m)

L : Comprimento de influência entre os condutores

h : Altura do líquido em relação à extremidade inferior do conjunto

2.6.6.2 Sensores capacitivos de área variável

Este sensor é conseguido mantendo constantes o tipo e a espessura do dielétrico e variando a área de influência do conjunto. As equações 2.6 e 2.7 mostram a capacitância varia direta e linearmente com a variação da área das placas do capacitor e com a variação da altura do cilindro.

Mendes Sobrinho (1987) desenvolveu um sensor baseado nesse modelo para determinar a evapotranspiração de referência através da medida de variação de nível de água em um tanque classe A. No seu experimento um fio de cobre esmaltado foi mergulhado em água formando um capacitor onde o cobre foi a

placa fixa, seu esmalte isolante foi o dielétrico e a massa de água, aproveitando de sua propriedade de ter as moléculas polarizadas por um campo elétrico, foi a placa condutora externa (figura 2.12). A resposta desse arranjo foi compatível com a do capacitor cilíndrico onde o raio da casca foi pouco maior que o raio do condutor central e, o nível de água definiu a altura da área de influência desta casca no conjunto, conforme equação 2.12)

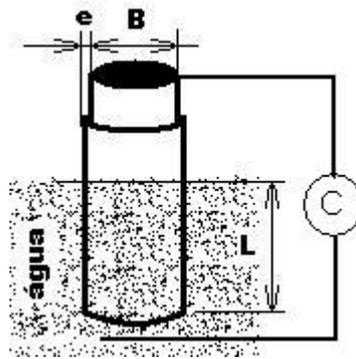


Figura 2.12. Capacitor de Mendes Sobrinho

$$C = 2\pi e_0 e_{R'} \frac{h}{\ln\left(1 + \frac{e}{R}\right)} \quad (2.12)$$

e: Espessura do isolante do condutor

h: Nível de água (altura do cilindro)

R: raio do condutor interno

ϵ_0 : Permissividade do vácuo ou ar ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Fm⁻¹)

$\epsilon_{R'}$: Constante relativa da permissividade do material;

Mendes Sobrinho experimentou nove condutores comerciais de diâmetros diferentes em arranjos compostos por várias espiras e fez testes para verificar:

- i) A robustez do condutor esmaltado à esforços mecânicos;
- ii) A resistência do esmalte isolante à corrosão provocada por água destilada, desmineralizada, de torneira e destilada com diferentes concentrações de NaCl;
- iii) A estabilidade do conjunto em relação a longo tempo de exposição em ambiente úmido;
- iv) O comportamento do sensor quando a temperatura da água variava até 100°C;
- v) A correlação entre a variação da capacitância e o deslocamento de água em termos de linearidade, repetitividade e sentido de deslocamento do fluido.

Como resultados ele pontuou que todos os condutores testados mostraram-se resistentes tanto à deterioração por esforços mecânicos de manuseio quanto à corrosão quando mergulhado em água durante 6 meses e, em relação à resposta do conjunto, ela apresentou-se linear com a variação de nível, reproduzível em qualquer sentido de deslocamento deste e independente da qualidade e da temperatura da água. Em relação à sensibilidade do conjunto ele concluiu que ela depende do diâmetro do condutor, de seu esmalte isolante e do comprimento efetivo da variação do mesmo em função da água, o que pode ser aumentado com arranjos de várias espiras onde o comprimento efetivo do condutor é diretamente proporcional ao número destas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Reservatório

Um reservatório foi feito na forma cilíndrica e utilizado com seu eixo orientado em direção vertical conforme figuras 3.1 e 3.2. Foi construído com um tubo PVC de 75mm de diâmetro e 800mm de altura e teve a extremidade superior tampada e a inferior vedada. Na tampa superior colocou-se um funil destinado a carregá-lo e a 100mm da base colocou-se um registro para permitir seu esvaziamento. O sistema de referência para calibração foi feito com uma mangueira transparente de 5mm de diâmetro interno cujas extremidades foram inseridas no interior do reservatório, uma a 150mm da base inferior e outra a 100mm do seu topo. Este conjunto foi fixado pela base inferior em um suporte de madeira para se manter na posição de trabalho estipulada.

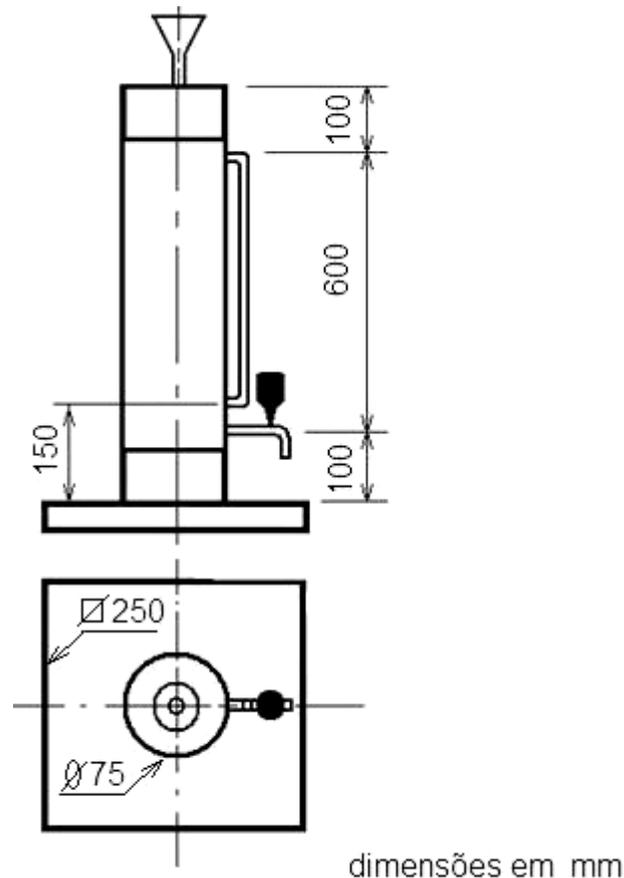


Figura 3.1: Detalhes construtivos do reservatório

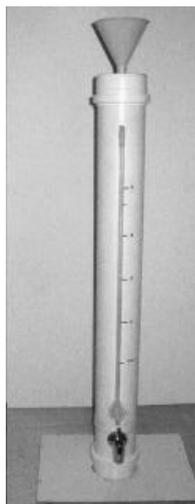


Figura 3.2 Fotografia do reservatório

3.2 Sensor

O sensor foi feito com um fio de cobre esmaltado, do tipo usado em enrolamentos de motores e transformadores, de 2,5mm de diâmetro externo fixado em um suporte conforme mostram as figuras 3.3 e 3.4. O fio acima foi escolhido por ser totalmente isolado eletricamente do meio externo através de um verniz protetor de alta qualidade espalhado uniformemente sua superfície externa. O suporte foi feito com um tubo de PVC de 12,5mm de diâmetro e 600mm de comprimento e teve um disco de PVC de 70mm de diâmetro e 5mm de espessura fixado em cada uma de suas extremidades.. Os discos foram furados de modo que o fio, esticado paralelamente ao longo do eixo do suporte, passava pelo furo de um disco e retornava na mesma direção para um furo do outro disco. Desta maneira foi tecida uma malha de seis voltas ao longo do suporte (isto foi interessante porque aumentou o comprimento efetivo do sensor em contato com o líquido atuando diretamente na sensibilidade do sistema). Nos discos foi aplicada uma massa de epóxi para manter o fio esticado..

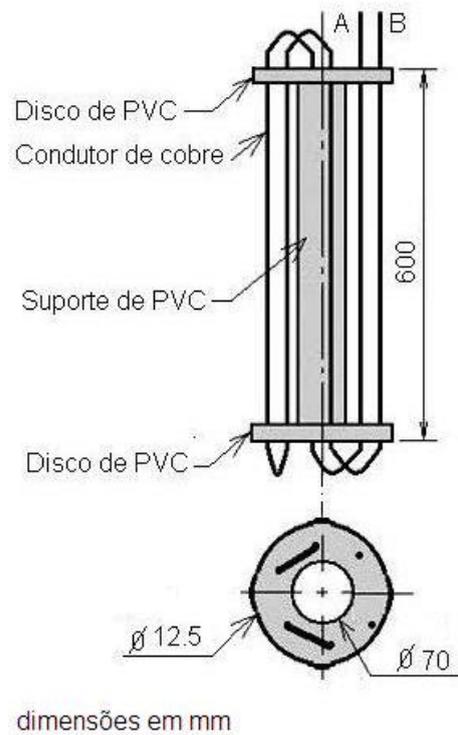


Figura 3.3 Detalhes construtivos do sensor



Figura 3.4 Fotografia do sensor

O sensor foi desenvolvido para trabalhar parcialmente mergulhado na água com uma de suas extremidades nela inserida e com a outra, onde ficavam as pontas do condutor, localizados numa região seca. Uma das pontas do condutor foi eletricamente conectada a um equipamento eletrônico de medição e a outra ficou

livre (figuras 3.5 e 3.6) . Dentro do reservatório, em contato elétrico constante com a água, foi colocado um condutor metálico para servir de retorno de sinal para o circuito eletrônico. Em operação o fio sensor e suas extremidades ficaram totalmente isolados eletricamente da água, o condutor de retorno em contato elétrico permanente com este líquido e a posição do sensor no reservatório definiu o ponto inicial de trabalho do sistema (ponto de zero)

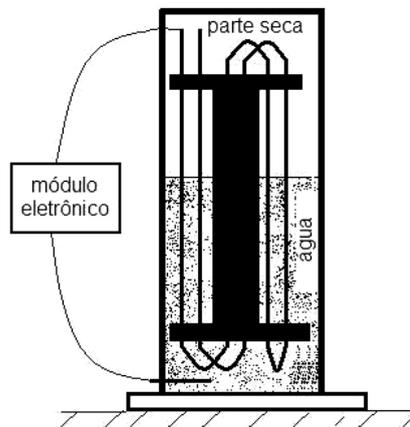


Figura 3.5 Detalhes de posicionamento do sensor dentro do reservatório.

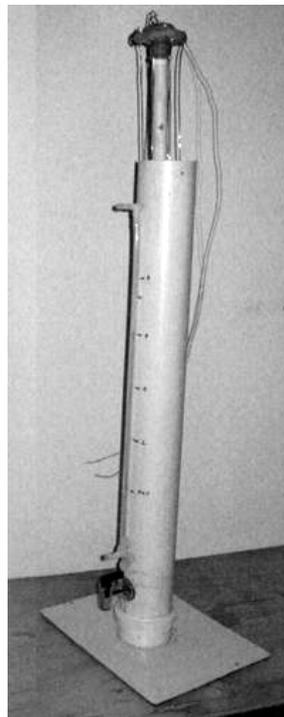
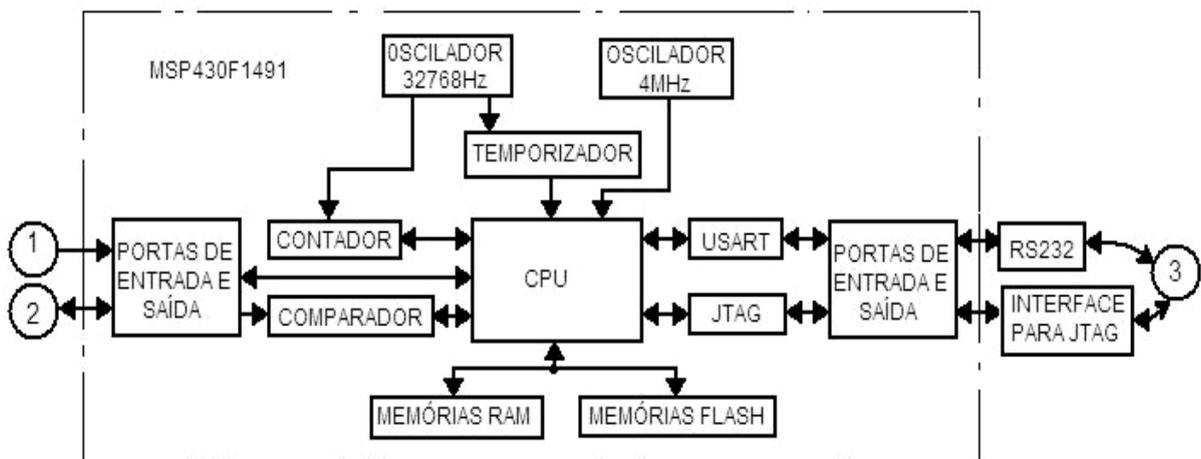


Figura 3.6 Fotografia do posicionamento do sensor no reservatório.

3.3 Módulo eletrônico

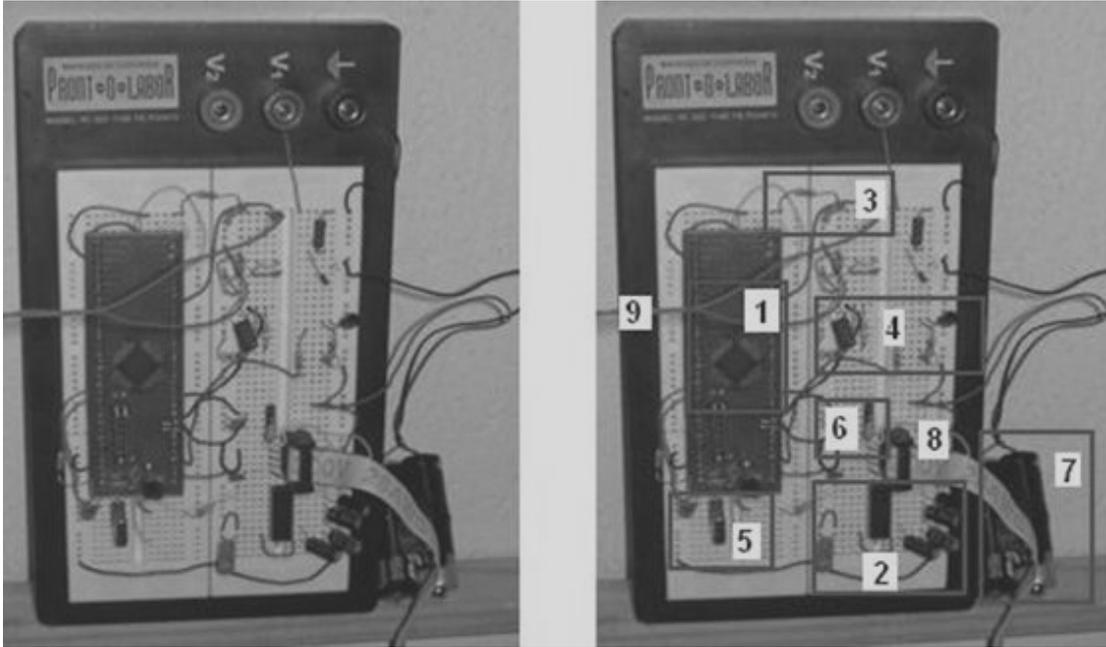
A unidade eletrônica foi montada com o microcontrolador *MSP430F1491* da Texas Instruments -TI. Dele foram utilizadas a unidade central de processamento (CPU), as unidades de memória *RAM* e *FLASH*, os osciladores de baixa e alta frequência, usando respectivamente cristais de 32,768kHz e 4MHz, um temporizador, um contador, um comparador analógico, um módulo de comunicação universal serial assíncrono (*USART*) e portas de entrada/saída. Externamente ao *MCU* foi usada uma interface serial tipo *RS232* para transferência de dados e um circuito eletrônico para permitir o uso da interface de programação tipo *JTAG* com a porta paralela do computador. A figura 3.7 mostra os blocos funcionais acima e as interligações entre eles e a 3.9 apresenta uma fotografia da montagem do circuito usando os componentes reais.

O MCU foi programado em linguagem *Assembly* através de um computador utilizando software de programação disponível gratuitamente na Internet e direcionado para *download* no site do fabricante do microcontrolador.



1: COMANDO EXTERNO DE PEDIDO DE TRANSFERÊNCIA DE DADOS; 2: SENSOR; 3: COMPUTADOR

Figura 3.7. Diagrama em blocos do sistema de medição de nível



- 1 Microcontrolador MSP430F1491 (soldado em placa de circuito impresso para permitir conexão em proto-on-board uma vez que é do tipo montagem em superfície)
- 2 Interface de comunicação serial MAX232 do tipo RS232 e seus componentes de configuração.
- 3 Malha resistiva para carga e descarga do sensor.
- 4 Circuito de disparo de transferência de dados e sinalização.
- 5 Cristal do oscilador de 4MHz
- 6 Cristal do oscilador de 32,768Hz.
- 7 2 pilhas AA de 1,5V cada.
- 8 Cabo de conexão serial.
- 9 Condutores de ligação do sensor.

Figura 3.8: Fotografia do circuito eletrônico montado em proto-on-board



Figura 3.9 Fotografia da interligação do sensor à unidade eletrônica.

3.4 Princípio de funcionamento do sensor

O comportamento do sensor é similar ao de um capacitor cilíndrico de dielétrico constante e área variável (item 2.6.6.2). A massa de água que envolve o condutor é casca externa cuja altura varia em função do nível, o condutor é a placa interna de tamanho constante e o esmalte isolante do condutor é o dielétrico. Considerando que a constante dielétrica do material isolante e sua espessura são constantes ao longo de todo o condutor, a capacitância torna-se função direta e linear da variação da área de influência da placa móvel em relação ao condutor central (Equação 2.12).

3.5 Princípio de medição de capacitância usado no sistema

A medição de capacitância é baseada na carga e descarga de um capacitor numa malha resistivo-capacitiva alimentada por tensão contínua, conforme circuito mostrado na figura 3.10.

Partindo da condição inicial de capacitor totalmente descarregado e chaves abertas, fecha-se a chave S1 e o capacitor entra em processo de carregamento através da resistência R1 conforme equação 3.1. Após transcorrer um tempo igual ou superior a $5R_1C$ a chave S1 é aberta e o capacitor fica armazenando uma tensão praticamente igual a da fonte. Nessa situação fecha-se S2 e o capacitor inicia o processo de descarga através da resistência R2 segundo a equação 3.2. Após um tempo igual ou maior que $5R_2C$ a chave S2 é aberta e o capacitor é considerado totalmente descarregado sendo a condição inicial re-estabelecida.

As equações 3.3 e 3.4 descrevem, respectivamente, o tempo gasto para a tensão sobre o capacitor atingir determinado valor nos períodos de carga e de

descarga, elas evidenciam que estes tempos variam direta e linearmente com a variação da capacitância.

No circuito eletrônico usado neste trabalho as chaves foram substituídas por portas de entrada e saída do microcontrolador (*MCU*), o capacitor foi trocado pelo sensor e a resistência de descarga foi feita muito maior que a de carga.

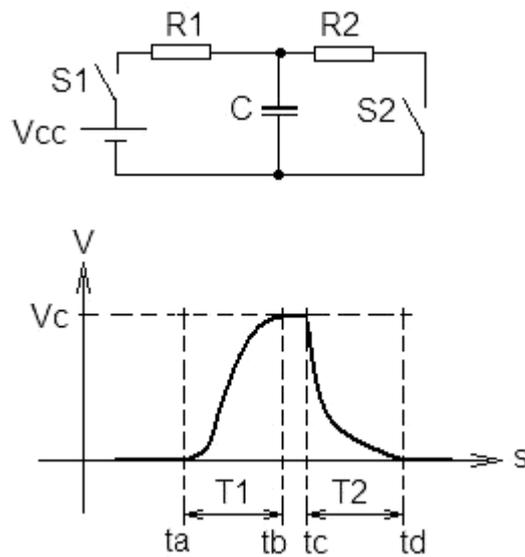


Figura 3.10. Malha resistiva para carga e descarga de um capacitor

$$V_c = V_{CC} \left(1 - e^{\frac{-T_1}{R_1 C}}\right) \quad (3.1)$$

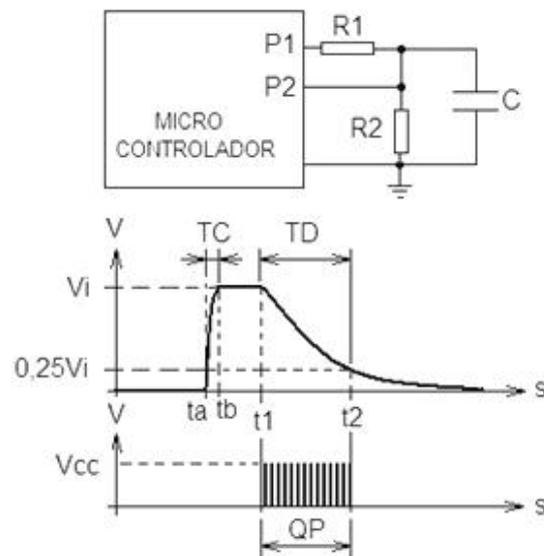
$$V_c = V_{CC} e^{\frac{-T_2}{R_2 C}} \quad (3.2)$$

$$T_1 = R_1 C \ln\left(1 - \frac{V_c}{V_{CC}}\right) \quad (3.3)$$

$$T_2 = R_2 C \ln\left(\frac{V_c}{V_{CC}}\right) \quad (3.4)$$

3.5.1 Medição do tempo de descarga do capacitor

O funcionamento do sistema foi apoiado na medição do tempo de descarga do sensor conforme mostra figura 3.11. Para fazê-lo o MCU carregava o sensor com uma tensão inicial V_i e, em seguida, o comandava a se descarregar sobre uma resistência ao mesmo tempo disparava um contador que passava a incrementar sua contagem de uma unidade cada vez que ocorria uma borda de descida nos pulsos gerados pelo seu oscilador interno de 32768Hz. Esta contagem acontecia até a tensão sobre o sensor atingir 25% do valor inicial quando era interrompida. A quantidade de pulsos contada expressava o tempo gasto entre o início e o final do processo de descarga.



t_a : instante de início de carga

t_b : instante de final de carga

TC: intervalo de carga

t_1 : instante do início de descarga

t_2 : instante de final de descara

TD: intervalo de descarga

QP: quantidade de pulsos imagem do tempo de descarga do capacitor

$TC \ll TD$

Figura 3.11 Circuito utilizado para contagem de tempo

3.6 Funcionamento do sistema

Funcionamento baseado no circuito apresentado na figura 3.12.

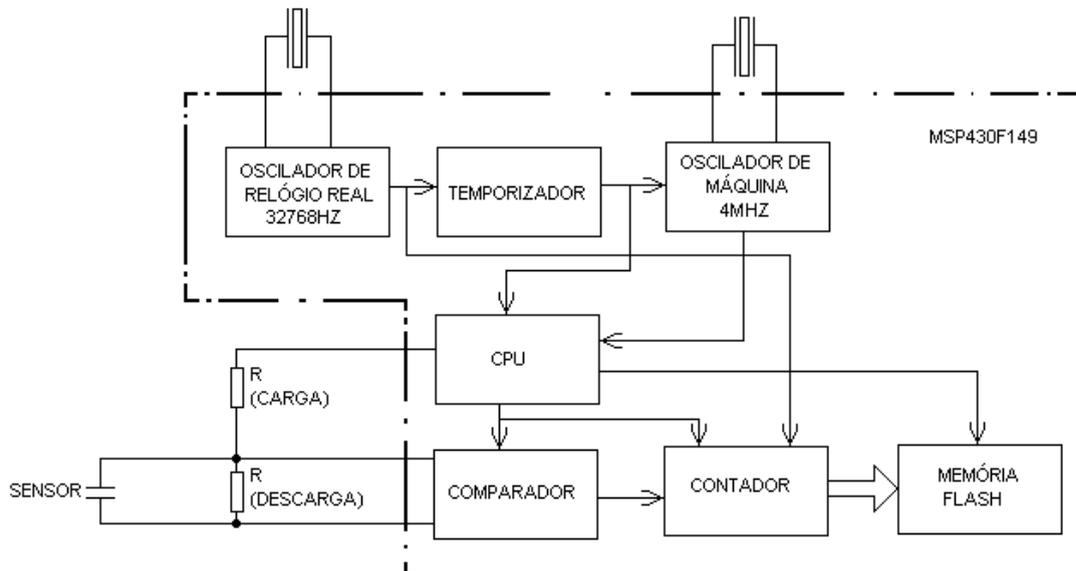


Figura 3.12. Unidades eletrônicas implementadas no sistema

3.6.1 Funcionamento principal

Ao ser ligado o sistema configurava a maioria de seus blocos funcionais a entrar na condição de repouso deixando em funcionamento apenas o oscilador de 32768Hz e o temporizador de tempo real. Ele só retornava ao modo de serviço quando recebia uma interrupção do temporizador, dada ao final do intervalo de tempo programado entre medições, ou quando recebia uma solicitação dada por comando externo para transferência de dados. A figura 3.13 mostra o algoritmo que descreve este funcionamento.

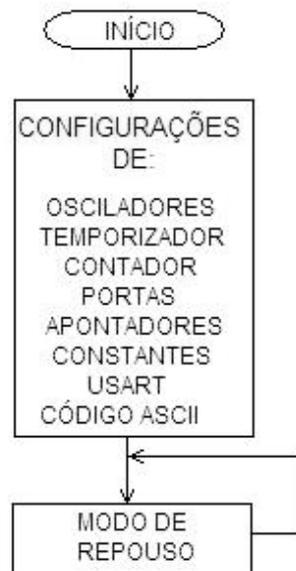


Figura 3.13. Algoritmo do funcionamento principal do sistema

3.6.2 Tratamento da solicitação de leitura

Conforme figura 3.14 ao receber a interrupção do temporizador o *MCU* entrava em operação e carregava o sensor até a tensão de alimentação, em seguida o comandava a se descarregar sobre uma resistência de referência e, ao mesmo tempo, dispara um contador e um comparador. O contador começava a contar os pulsos de clock do oscilador de tempo real (32768Hz) e o comparador a monitorar a tensão sobre o sensor. Quando esta se tornava igual a 25% da inicial o comparador interrompia a contagem e comandava o *MCU* a carregar novamente o capacitor reiniciando o ciclo de carga/descarga. Esta dinâmica era repetida 1000 vezes e feita de modo que, ao ser disparado, o contador somava os novos pulsos aos armazenados no ciclo anterior. Ao final da etapa de leitura a quantidade de pulsos totalizados no contador era armazenada em uma posição de memória *FLASH* e a *MCU* retornava o sistema à condição de repouso.

O sistema foi concebido para armazenar 5000 medidas de nível e, após armazenar esta quantidade, ele escrevia a próxima sobre a primeira. Com esta lógica as últimas 5000 medições eram preservadas.

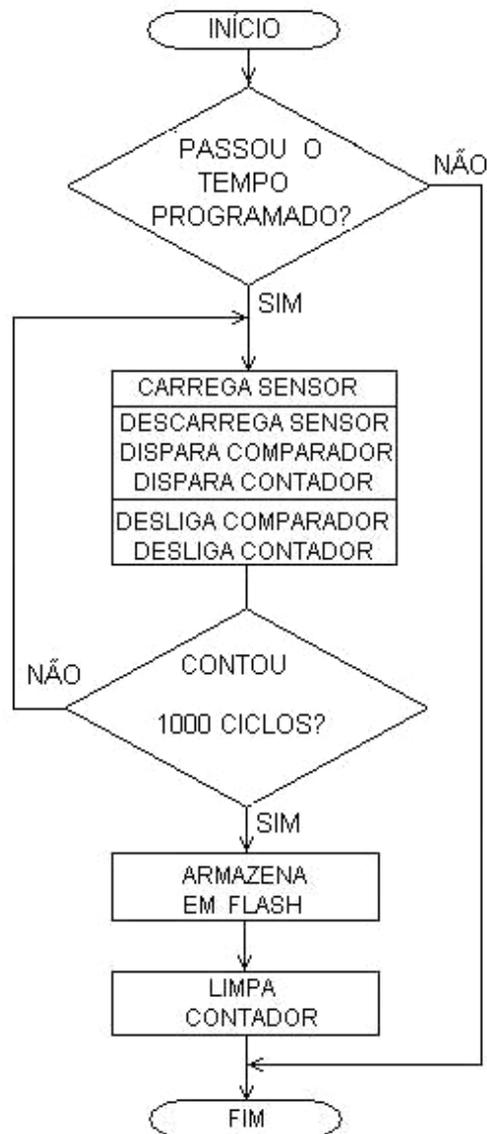


Figura 3.14 Algoritmo da solicitação de leitura

Vale ressaltar que a memória tipo FLASH tem a qualidade de conservar a informação nela escrita mesmo se a alimentação do sistema for desligada. Para que a mesma seja apagada é necessário uma operação de apagamento gerenciada pela CPU tal qual a operação de escrita.

3.6.3 Tratamento da solicitação de transferência

Ao receber a interrupção de transferência de dados a CPU acessava o primeiro dado armazenado na região da memória FLASH o codificava em ASCII e o transmitia via porta serial para o computador externo. Em seguida repetia o ciclo para o segundo dado e, assim por diante, transmitia todos os dados armazenados. Ao fim desta operação o sistema retornava à condição de repouso. A figura 3.15 mostra o algoritmo relativo a esta operação.



Figura 3.15. Algoritmo da operação de transferência de dados

Os dados transmitidos eram recebidos pelo programa Hyper-terminal, disponível no sistema operacional WINDOWS e salvos como arquivo tipo texto. Este arquivo era aceito pelo programa EXCEL onde eram tratados e disponibilizados na forma de Tabelas para o programa MINITAB que os tratava estatisticamente.

3.7 Tratamento estatístico das medições

3.7.1 O teorema central do limite

No item 3.6.2 comentou-se que cada informação de nível armazenado era a somatória dos pulsos de clock contados em 1000 períodos consecutivos de descarga do sensor. Isto foi implementado para tratar estatisticamente os erros de leitura possíveis de aparecer nos instantes inicial e final de cada período de descarga. Estes erros poderiam ocorrer em função do não sincronismo entre os pulsos de relógio (32768Hz) e de máquina (4MHz) e pelos tempos de execução das instruções do MCU que causariam um “escorregamento” aleatório do primeiro e do último pulso de cada período contado em relação aos seus instantes de início e término. Além disso, variáveis aleatórias como temperatura e ruídos eletromagnéticos poderiam afetar os pontos de comparação e provocar uma conseqüente variação nos números de pulsos contados.

Como os erros mencionados eram de qualidade aleatória utilizou-se a teoria central do limite para justificar o uso de vários ciclos de descarga do sensor e a teoria da distribuição normal de probabilidades para quantificar a incerteza da medição.

Toda vez que um experimento aleatório for replicado, a variável aleatória que for igual ao resultado médio (ou total) das réplicas tenderá a ter uma distribuição

normal, à medida que o número de replicas se torne grande” e “Se os erros dos componentes forem independentes e igualmente prováveis de serem positivos ou negativos, então se pode provar que o erro total terá uma distribuição normal aproximada (MONTGOMERY, 2004).

Embora não seja possível compensar o erro aleatório de um resultado de medição ele pode geralmente ser reduzido aumentando-se o número de observações: sua esperança ou valor esperado é zero (INMETRO,1998).

Além de ser útil no tratamento estatístico e na filtragem de ruídos o uso de vários intervalos de descarga do sensor na composição de uma medida de nível aumentou a sensibilidade do sistema, uma vez que aumentou o número de pulsos totalizados por unidade de comprimento e esta quantidade era imagem do nível nível.

3.7.2 A distribuição normal

A distribuição normal apresenta o valor esperado de uma variável através da média de uma determinada amostra e da dispersão dos resultados em torno desta média mostrados pela sua variância e pelo seu desvio padrão (DP) como mostra as equações 3.5, 3.6 e 3.7 respectivamente. Segundo Barbetta (2000) os valores estarão distribuídos em torno da média na proporção de 68,3% contidos no intervalo definido por \pm um *DP*; 95,4% contidos no intervalo de ± 2 *DP* e 99,7% no intervalo de ± 3 *DP* (figura 3.16. Segundo Montgomery (2004) outro dado precioso da distribuição normal é o erro padrão que indica o quanto à média amostral se aproxima do valor real da população estudada (equação 3.8).

Segundo Gonçalves Jr.(2002) é comum adotar, em boa parte das calibrações de instrumentos 1,96 *DP* em torno da média como margem de erro aceitável. Isto significa que 95,4% das medições feitas estarão contidas neste intervalo de confiança. Sendo que menor faixa de erro se aplica a instrumentos especiais ou à necessidade do usuário.

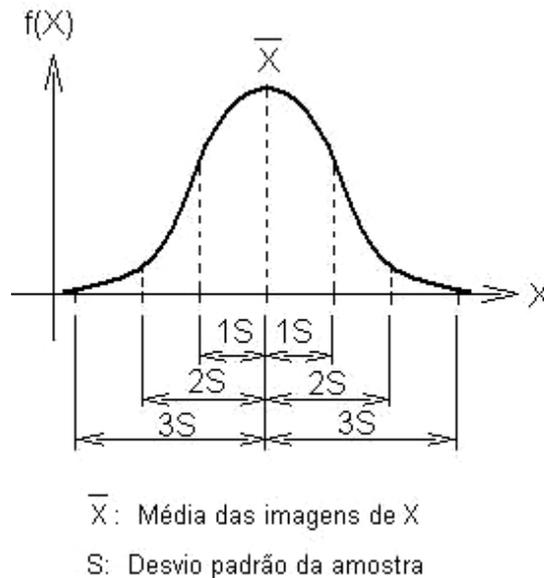


Figura 3.16 exemplo da distribuição normal

$$\bar{X} = \sum X / n \quad (3.5)$$

? é o número de elementos da amostra

$$S^2 = \frac{\sum X^2 - n\bar{X}^2}{n-1} \quad (3.6)$$

$$S = \sqrt{S^2} \quad (3.7)$$

$$S\bar{X} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3.8)$$

3.7.3 A incerteza da medição

Segundo o Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO,1998) uma medida necessita apresentar uma indicação da sua confiabilidade sem a qual não pode ser comparada com outras feitas pelo sistema ou com padrões de referência e, mesmo quando todos os componentes de erro conhecidos ou suspeitos tenham sido avaliados e as correções adequadas aplicadas, ainda assim a medida apresenta uma incerteza. Segundo o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia - VIM (2000), incerteza é um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando.

A melhor estimativa disponível do valor esperado de uma grandeza que varia aleatoriamente, e para a qual várias observações independentes foram feitas, é a média aritmética das observações. A variância experimental da média e seu desvio padrão experimental quantificam quão bem a média estima a esperança do valor real podendo ser usados, qualquer um deles, como medida da incerteza da média (INMETRO,1998).

3.8 Ensaio de calibração do sistema

Foi estabelecida uma faixa de trabalho de 296mm com o ponto de referência, chamado de nível 0, fixado 150mm acima do registro de esvaziamento do reservatório (figura 3.18). Sobre o corpo da mangueira foram feitas 5 marcações sendo a primeira no ponto de nível 0 e cada uma das seguintes 74mm acima da anterior. Os ensaios de calibração do sistema foram feitos acrescentando ou

retirando água ao reservatório até a superfície do líquido se posicionar sobre a marca de interesse quando, após a estabilização do nível, realizaram-se as medições.

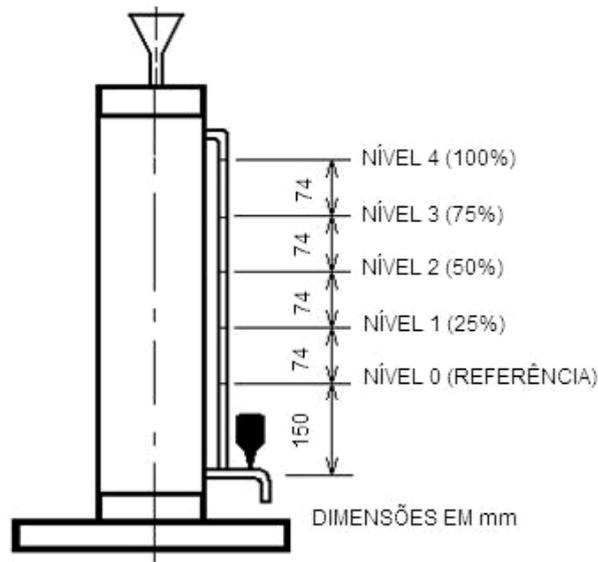


Figura 3.17. Faixa de trabalho e pontos de referência para calibração

3.8.1 Medição da capacitância do sensor em função do nível de água

O recipiente foi carregado até a superfície do líquido se posicionar sobre uma marca de referência na mangueira. Os ensaios foram realizados nos cinco níveis de referência e, em cada um deles, foram realizadas quatro medições consecutivas da capacitância, cada uma 60 segundos após a anterior, com um capacímetro digital comercial (RLC800 da INSTRUTHERM). Este ensaio foi feito para conhecer os limites de capacitância do sensor e dimensionar as constantes usadas na programação do *MCU* e, também, para se ter um “padrão de comparação” capacitivo do sistema.

3.8.2 Ensaio de repetitividade do sistema:

Repetitividade é o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição, ou seja, mesmo procedimento de medição, mesmo observador, mesmos instrumentos, mesmo local e repetição em curtos intervalos de tempos (INMETRO,1998)

Este ensaio foi feito carregando o reservatório até a superfície de água se posicionar sobre uma marca de referência e, após o nível se estabilizar, foram realizadas automaticamente várias medições, cada uma 60 segundos após a anterior. Este ensaio foi realizado em cada posição de nível tomada como referência (0, 25%, 50%, 75% e 100%) e usado para verificar a dispersão das medidas em relação à média da amostra e a linearidade do sistema.

O número de amostras estipulado foi de 30, uma vez que, para muitas aplicações práticas este número é satisfatório para aproximar a distribuição amostral de uma normal, independentemente do tamanho da população (Montgomery, 2004 e Barbetta, 2005)

Após avaliar o sistema em toda faixa de trabalho repetiu-se o ensaio para o nível na cota máxima e variações entre medidas de 200 segundos e, em seguida, nível na cota mínima e variação em intervalos de 1800 segundos com o objetivo de verificar o comportamento do sistema para intervalos maiores entre as etapas de medição.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaio para verificação da capacitância do sensor

A tabela 4.1 e a figura 4.1 mostram as capacitâncias do sensor medidas com um capacitômetro digital comercial para os níveis de referência da faixa de medição do reservatório.

Tabela 4.1. Ensaio inicial para analisar a capacitância do sensor em função do nível d'água

marca	nível (mm)	ensaio 1 (nF)	ensaio 2 (nF)	ensaio 3 (nF)	ensaio 4 (nF)	média (nF)
0	0	2,74	2,73	2,74	2,73	2,74
1	74	4,29	4,29	4,31	4,29	4,30
2	148	5,79	5,8	5,78	5,79	5,79
3	222	7,22	7,22	7,21	7,22	7,22
4	296	8,57	8,56	8,56	8,56	8,56

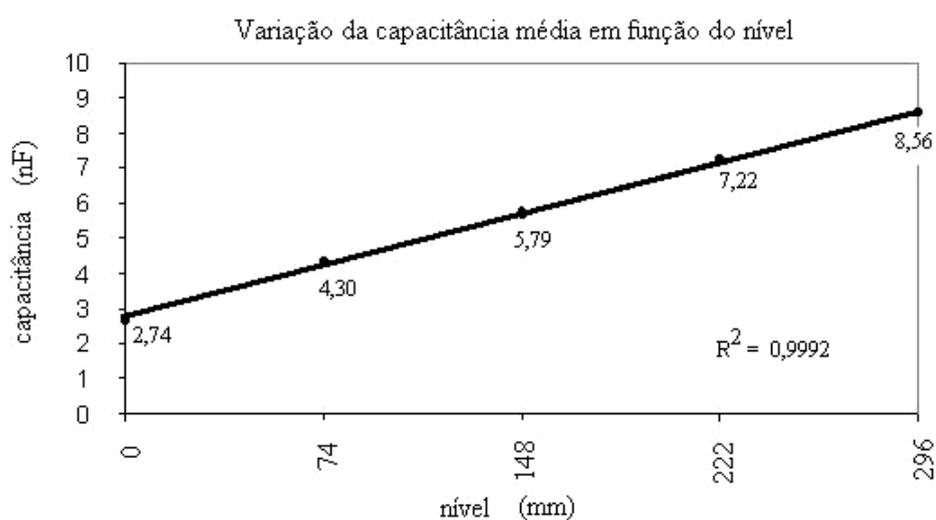


Figura 4.1. Capacitância de saída do sensor em função do nível de água

4.1.1 Análise dos resultados de linearidade e repetitividade do sensor

As medições de capacitância sugerem que o sensor apresenta boa repetitividade e evidenciam sua elevada linearidade (coeficiente de determinação R^2 tendendo a 1) e sensibilidade média de $19,7 \text{ pFmm}^{-1}$.

Cabe ressaltar que o valor referente ao nível zero depende do posicionamento do sensor no reservatório..

4.2 Ensaio de repetitividade do sistema

Considerações importantes:

As tabelas e figuras deste item mostram os resultados de medições feitas pelo sistema completo, ou seja, parte sensora mais parte eletrônica. O título de cada sub-item, bem como a identificação de cada tabela e figura já qualificam a que nível os resultados pertencem.

As figuras que mostram as curvas de probabilidades e os histogramas foram geradas pelo programa de análise estatística MINITAB. Nestas representações as janelas presentes nos gráficos apresentam, em relação às amostras utilizadas: o tamanho (N), a média (*mean*), o desvio padrão (*StDev*), o método de análise de normalidade usado pelo programa (*AD_Anderson Darling*) e o resultado desta análise (*P-value*). Se esta última informação for maior que 0,005 o programa considera os eventos analisados como tendo característica normal.

4.2.1 Ensaio de repetitividade para o nível zero

Tabela 4.2. Pulsos totalizados pelo sistema no nível 0

Contagem	Nº de Pulsos	Contagem	Nº de pulsos	contagem	Nº de Pulsos
1	14004	11	14007	21	14005
2	14057	12	14012	22	13995
3	14023	13	13983	23	13989
4	13986	14	14002	24	13966
5	14025	15	14015	25	13986
6	14009	16	14001	26	13957
7	14024	17	13985	27	14003
8	14004	18	13994	28	14001
9	14008	19	13991	29	14008
10	14015	20	13973	30	13979
				31	13939

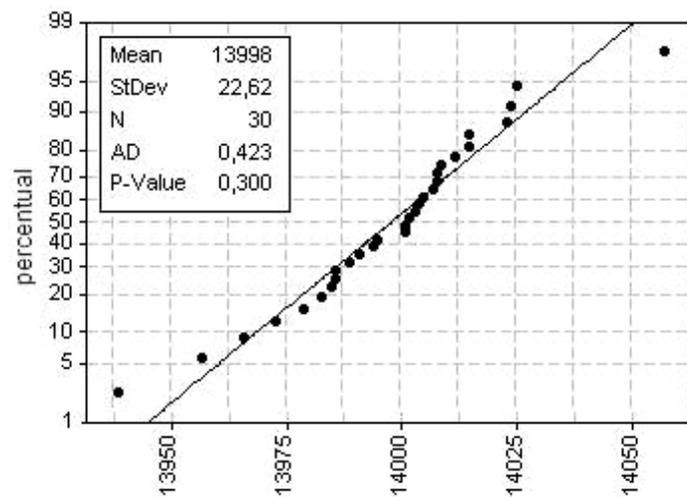


Figura 4.2. Curva de probabilidades dos pulsos totalizados no nível 0

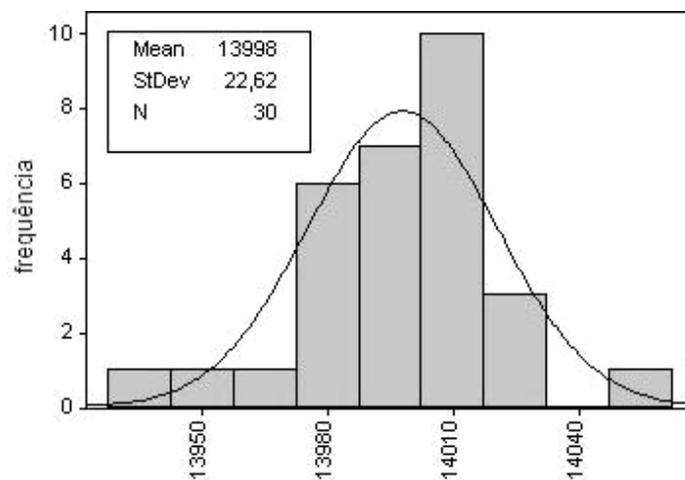


Figura 4.3. Histograma dos pulsos totalizados no nível 0

4.2.2 Ensaio de repetitividade para o nível 74mm

Tabela 4.3. Pulsos totalizados pelo sistema no nível 74mm

contagem	Nº de Pulsos	contagem	Nº de pulsos	contagem	Nº de Pulsos
1	21357	11	21419	21	21412
2	21373	12	21432	22	21376
3	21367	13	21409	23	21357
4	21324	14	21415	24	21385
5	21350	15	21373	25	21391
6	21373	16	21395	26	21372
7	21364	17	21370	27	21363
8	21440	18	21422	28	21409
9	21357	19	21421	29	21395
10	21422	20	21382	30	21389
				31	21395

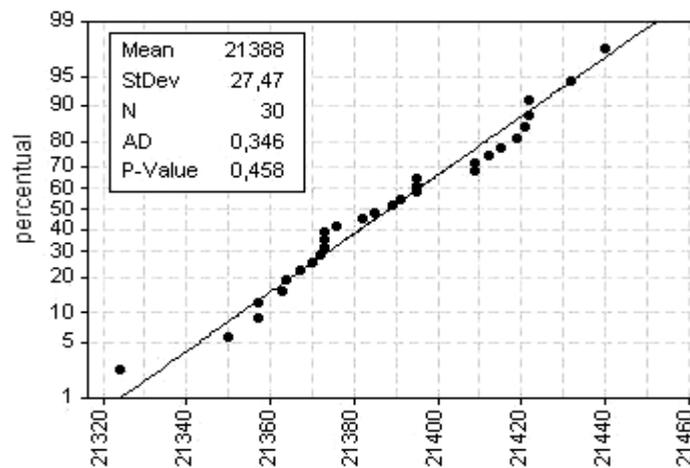


Figura 4.4. Curva de probabilidades dos pulsos totalizados no nível 74mm

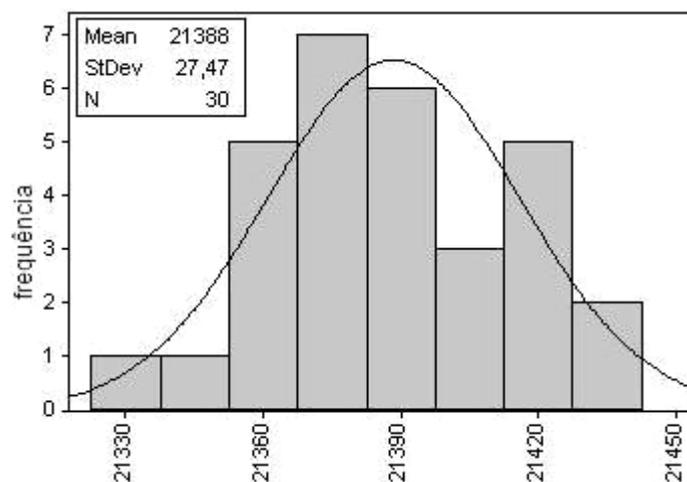


Figura 4.5. Histograma dos pulsos totalizados no nível 74mm

4.2.3 Ensaio de repetitividade para o nível 148mm

Tabela 4.4. Pulsos totalizados pelo sistema no nível 148mm

contagem	Nº de Pulsos	contagem	Nº de pulsos	contagem	Nº de Pulsos
1	28906	11	28677	21	28671
2	28725	12	28803	22	28730
3	28588	13	28678	23	28745
4	28637	14	28691	24	28633
5	28856	15	28683	25	28726
6	28903	16	28803	26	28643
7	28656	17	28693	27	28670
8	28778	18	28548	28	28765
9	28906	19	28904	29	28668
10	28614	20	28696	30	28675
				31	28669

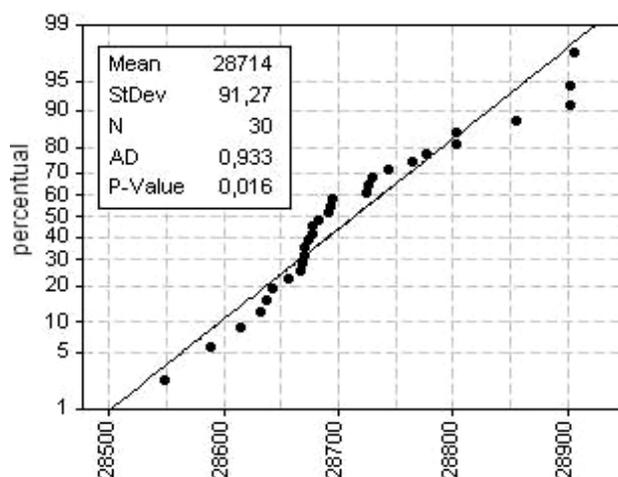


Figura 4.6. Curva de probabilidades dos pulsos totalizados no nível 148mm

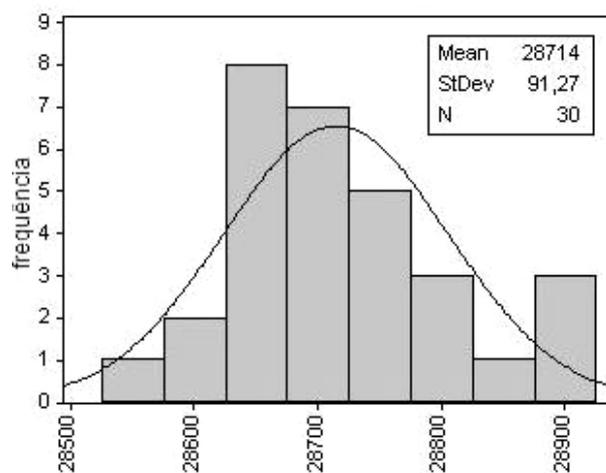


Figura 4.7. Histograma dos pulsos totalizados no nível 148 mm

4.2.4 Ensaio de repetitividade para o nível 222mm

Tabela 4.5. Pulsos totalizados pelo sistema no nível 222mm

contagem	Nº de Pulsos	contagem	Nº de pulsos	Contagem	Nº de Pulsos
1	36357	11	36436	21	36469
2	36326	12	36421	22	36424
3	36300	13	36413	23	36424
4	36266	14	36368	24	36465
5	36513	15	36353	25	36373
6	36335	16	36385	26	36432
7	36314	17	36447	27	36388
8	36405	18	36449	28	36388
9	36360	19	36451	29	36442
10	36382	20	36402	30	36404
				31	36434

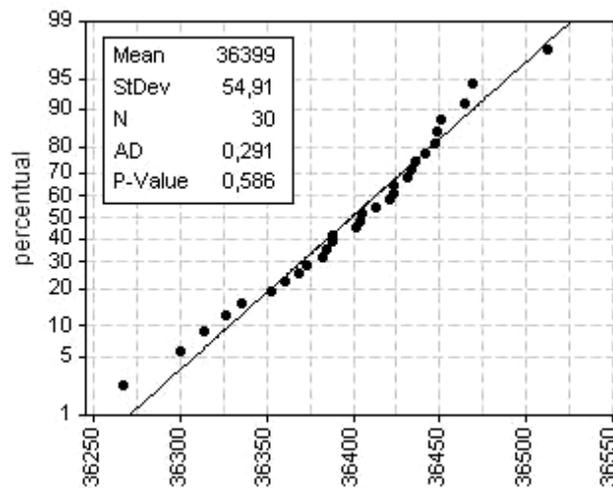


Figura 4.8. Curva de probabilidades dos pulsos totalizados no nível 222mm

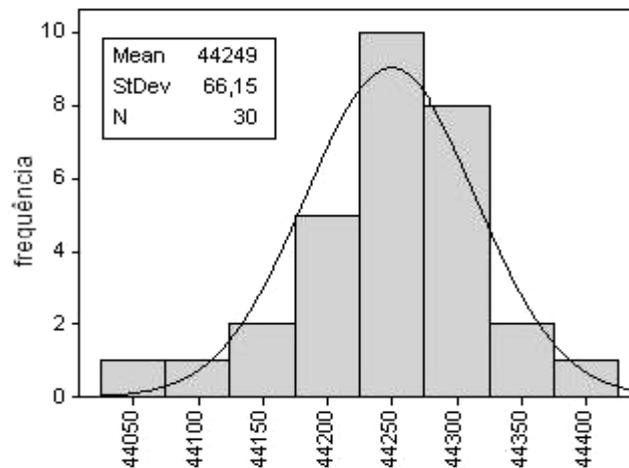


Figura 4.9. Histograma dos pulsos totalizados no nível 222mm

4.2.5 Ensaio de repetitividade para o nível 296mm

Tabela 4.6. Pulsos totalizados pelo sistema no nível 296mm

Contagem	Nº de Pulsos	contagem	Nº de pulsos	contagem	Nº de Pulsos
1	43999	11	44030	21	44029
2	44006	12	44043	22	44002
3	43997	13	43988	23	44016
4	43948	14	43965	24	44030
5	43999	15	43990	25	43943
6	43945	16	44021	26	43980
7	43986	17	44080	27	43963
8	43989	18	43994	28	43998
9	43931	19	44013	29	43995
10	44009	20	44033	30	43975
				31	43992

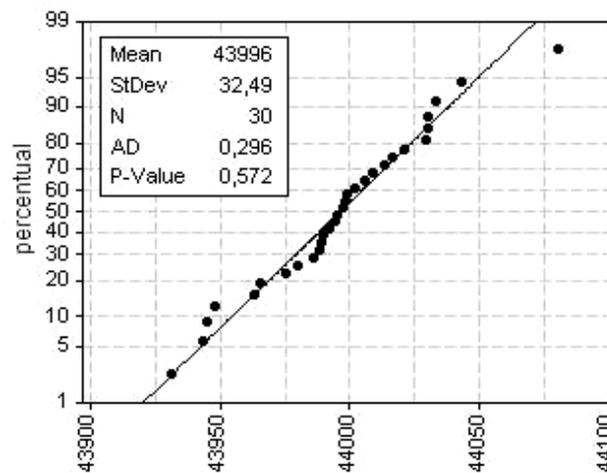


Figura 4.10. Curva de probabilidades dos pulsos totalizados no nível 296mm

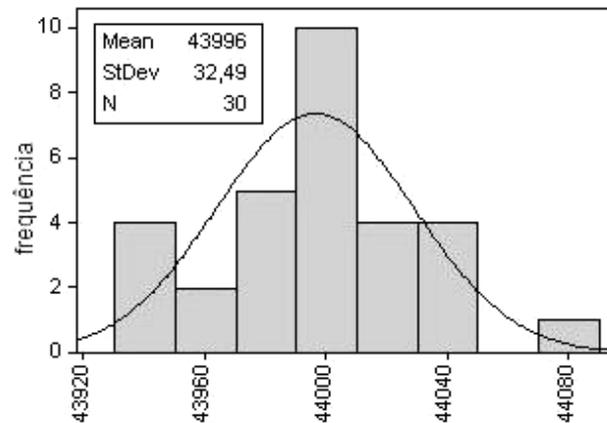


Figura 4.11. Histograma dos pulsos totalizados no nível 296mm

4.2.6 Resumo dos resultados de repetitividade e análise dos resultados em relação às médias das medidas

Tabela 4.7. Resumo das médias das contagens de pulsos

Nível (cota)	Nível (mm)	Pulsos (média)	Desvio Padrão (pulsos)	Erro Padrão (pulsos)	E_{DP} (% da faixa de pulsos)	E_{PM} (% da faixa de pulsos)
0	0	13998	22,62	4,12	0,075	0,013
1	74	21388	24,47	4,46	0,082	0,014
2	148	28714	91,27	16,66	0,30	0,055
3	222	36399	54,91	10,02	0,18	0,033
4	296	43996	32,49	5,93	0,11	0,019

Total de variação de pulsos da faixa considerada : 29998 pulsos

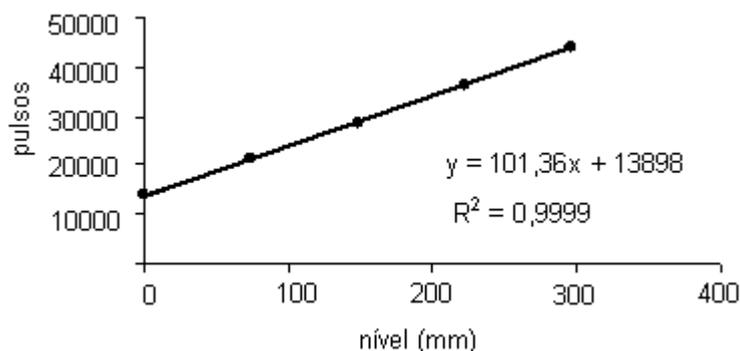


Figura 4.12. Curva resposta das médias dos pulsos totalizados em função de cada nível

O teste de normalidade realizado pelo programa MINITAB aponta que o sistema responde segundo a distribuição normal de probabilidades.

Como o maior desvio padrão experimental foi de 91,27 pulsos pode-se prever 95,4% das medições estarão afastadas menos que 182,5 pulsos da média, o que corresponde a um erro menor ou igual a 0,6% da faixa de trabalho

O maior erro padrão experimental mostra que a média da amostra estima com desvio máximo de 16,66 pulsos, ou 0,06% da faixa de trabalho, o valor esperado da medida real.

O sistema apresenta boa linearidade com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9999 o que indica uma sensibilidade média de 101,36 pulsos por milímetros.

4.3 Ensaio de estabilidade do sistema em intervalos de leituras elevados

Observe para item as mesmas observações mencionadas no item 4.2

4.3.1 Ensaio para medições no nível 0 com intervalo entre leituras de 1800 segundos

Tabela 4.8. Quantidade de pulsos contados pelo sistema no nível mínimo em intervalos 1800 segundos entre leituras

Contagem	Nº de Pulsos	Contagem	Nº de pulsos	contagem	Nº de Pulsos
1	13856	11	13960	21	13898
2	13881	12	14065	22	13891
3	13930	13	13811	23	13996
4	13895	14	13959	24	13828
5	13864	15	13956	25	14105
6	13818	16	13754	26	13958
7	13916	17	13906	27	13950
8	13919	18	13806	28	13916
9	13924	19	13844	29	13983
10	14044	20	13772	30	13817
				31	13936

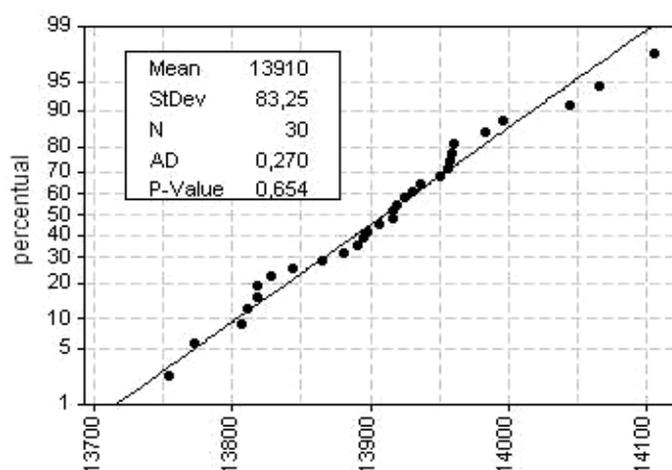


Figura 4.13. Curva de probabilidades para contagens feitas no nível mínimo em intervalos de 1800 segundos

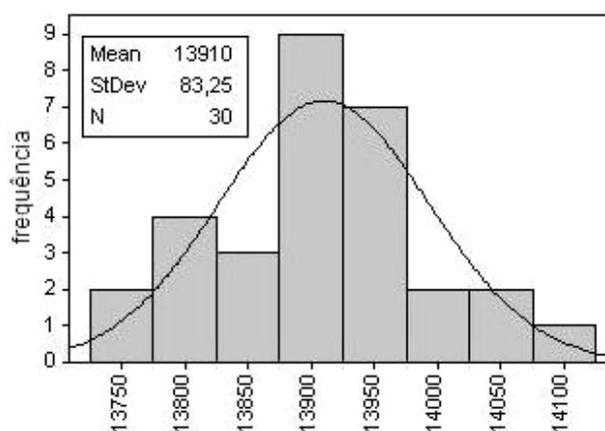


Figura 4.14. Histograma para contagens feitas na cota mínima em intervalos de 1800 segundos

4.3.2 Ensaio para medições no nível 296mm com intervalo entre leituras de 200 segundos

Tabela 4.9. Quantidade de pulsos contados pelo sistema no nível máximo com intervalo de 200 segundos entre leituras.

Contagem	Nº de Pulsos	Contagem	Nº de Pulsos	contagem	Nº de Pulsos
1	44228	11	44211	21	44298
2	44268	12	44224	22	44381
3	44242	13	44273	23	44307
4	44254	14	44290	24	44265
5	44248	15	44259	25	44330
6	44236	16	44300	26	44275
7	44224	17	44306	27	44235
8	44291	18	44268	28	44163
9	44157	19	44193	29	44111
10	44275	20	44338	30	44073
				31	44180

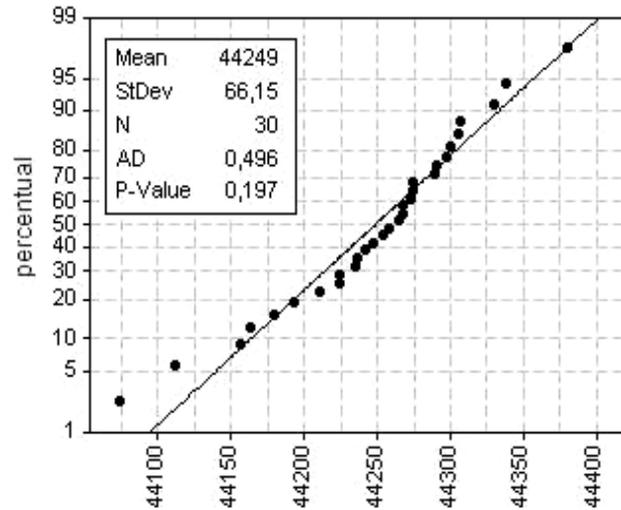


Figura 4.15. Curva de probabilidades para contagens feitas no nível máximo em intervalos de 200 segundos

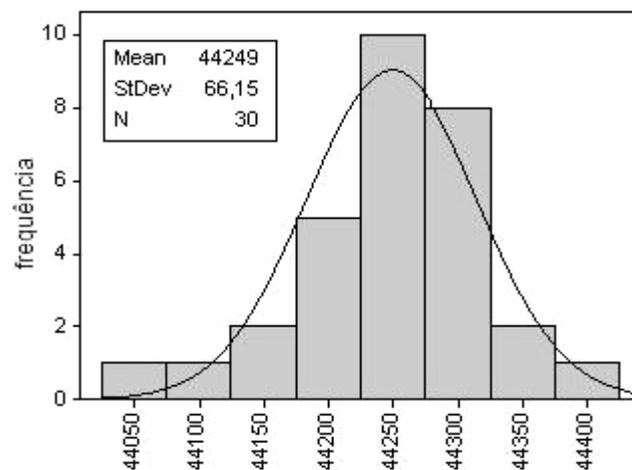


Figura 4.16. Histograma para contagens feitas no nível máximo em intervalos de 200 segundos

4.3.3 Análise dos resultados de repetitividade para leituras em tempos longos.

A tabela 4.10 mostra dados comparativos entre as medidas feitas nos níveis mínimo e máximo em intervalos de tempo diferentes e a medida feita no ensaio de 60 segundos que apresentou maior desvio em relação à média (nível 148mm)

Tabela 4.10. Comparação entre ensaios de repetitividade para os níveis mínimo e máximo

Nível (mm)	tempo (s)	Pulsos (média)	Desvio Padrão (pulsos)	Erro Padrão (pulsos)	E_{DP} (% da faixa de pulsos)	E_{PM} (% da faixa de pulsos)
0	60	13998	22,62	4,12	0,08	0,013
0	1800	13910	83,25	15,20	0,28	0,051
296	60	43996	32,49	5,93	0,11	0,019
296	200	44228	66,15	12,08	0,22	0,040
148	60	28714	91,27	16,66	0,30	0,055

Tanto para as medições feitas em intervalos de 1800 segundos quanto para medições feitas em intervalos de 200 segundos o sistema respondeu segundo a distribuição normal portanto, 95,4% das medições feitas terá desvio menor que 2 desvios padrão em torno da média.

Os resultados mostram desvios padrões compatíveis entre os ensaios feitos em 60 segundos, 200 segundos e 1800 segundos (sendo que o máximo ocorreu no nível 148mm no ensaio de 60 segundos), assim, as considerações de incerteza tratadas no item 4.2.6 também se aplicam às medições feitas com outros intervalos de tempo.

As diferenças entre as médias dos níveis nos ensaios de nível mínimo e máximo em tempos diferentes podem ser creditadas ao fato de que as condições do teste foram alteradas pelas consecutivas etapas de carregamento e esvaziamento do reservatório, a qualidade de leitura do nível feita no visor de referência de 5mm de diâmetro que pode ser comprometida pela qualidade de coesão das moléculas de água, e ao fato de variações serem comuns em amostras aleatórias. Além disto, por recomendações do INMETRO (1998), o ensaio de repetitividade deve ser feito em pequenos intervalos de tempo entre as medidas justamente para manter as mesmas condições ambientais.

5 CONCLUSÕES

O sistema de medição apresentou comportamento compatível com a distribuição normal de probabilidades tanto para pequenos quanto para grandes intervalos de tempos entre medições.

Os desvios padrões experimentais e os erros padrões das médias se mostram compatíveis, tanto para pequenos quanto para grandes intervalos entre medições sugerindo que o sistema apresenta-se estável em relação ao tempo entre leituras

Dentro da faixa de trabalho o sistema mostrou resposta linear com sensibilidade média de 101,4 pulsos por milímetro, o que corresponde a 0,34% do valor de variação de toda a faixa.

O sistema apresentou incerteza de medição de 182,5 pulsos em relação à média amostral para 95,4% das medições (valor equivalente ao dobro do desvio padrão experimental máximo) o que corresponde a um desvio máximo de 1,8 mm de nível, 0,6% em relação a faixa de trabalho, sendo aplicável em processos onde esta faixa de erro é aceitável.

A resposta do sistema representou o nível com bastante aproximação, haja vista que o erro padrão da média amostral foi, no pior desvio padrão anotado, de 16,7 indicando que a média da amostra se afastou da média admitida como real, em um universo de 29998 pulsos, de 0,0555%.

6 PERSPECTIVAS

O sistema apresenta possibilidade de utilização nas mais diversas áreas de medição de nível de água onde é necessário fazê-lo de forma automática durante longo período de estudo. Propostas interessantes para prosseguimento deste trabalho seriam:

- Estudo do sistema para uso com sensores de grande comprimento, como no caso de avaliação da variação de lençol freático na faixa de 3 a 4 metros.
- Adaptação do sistema para utilização em atividades que exigissem menores erros com maiores sensibilidades em medições realizadas em menores intervalos de monitoramento, como por exemplo, no uso de evaporímetros para tanques classe A e em pluviógrafos, onde seria necessário acompanhar a variação de nível em até 200mm durante 2 horas.
- Utilização do sistema em estudos onde haja necessidade de automação, como exemplo, em um trabalho de pesquisa na área ambiental onde existisse a necessidade de esvaziamento diário de um pluviógrafo quando não fosse detectada variação de nível.
- Desenvolvimento de uma interface para comunicação com o usuário que apresentasse os resultados de forma tabelada e gráfica privilegiando as informações de maior interesse. Isto simplificaria bastante os trabalhos do usuário, pois diminuiria a necessidade de utilização de outros softwares para coleta e tratamento de dados, além de tornar o sistema mais atraente comercialmente.
- Estudar o comportamento do sistema para líquidos diferentes de água. Isto abriria um grande leque de utilização.

7 BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS-ABAS,[200-]
Disponível em:
http://www.abas.org.br/index.php?PG=aguas_subterraneas&SPG=aguas_subterraneas_as_as
Acesso em dezembro de 2007.

BARBETTA,P.A.,**Estatística aplicada às Ciências Sociais**,6.ed, Florianópolis: Ed. Da UFSC, 2006, 215p.

BARTH, F.T.;BARBOS, WW.E.S. ;**Recursos Hídricos**. São Paulo 1996, [s.n.t.]
Disponível em: http://143.107.96.240/phd/LeArq.aspx?id_arq=123
Acesso em: Dezembro de 2007

CARNEIRO,C.J.G.;LIRA C.A.B.O.; SOBRINHO J.A.M.; ANTONINO,A.C.D.; MELLO, F.L.V.; **Sensor Capacitivo para Medida do Nível de Água**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.32,n.6, p.617-620,1997

CARVALHO,N.O. **Novos métodos e equipamentos em hidrometria: parte1 – medida do nível de água**, Rev. A Água em Revista: CPRM-MME, v.4,n.7,p.9-14, maio de 1996.

CARVALHO,N.O. **Novos métodos e equipamentos em hidrometria: parte2 – medida do nível de água**, Rev. A Água em Revista: CPRM-MME, v.4,n.7,p.9-14, maio de 1996.

CASTRO, J.B.F.;ANJOS,L.M.;PRADO,M.J. **Medidor eletropneumático na medição do nível de água em poços profundos**. Rev. Mecatrônica Atual, n.1, p. 48-49, 2004

FIALHO,A.B., **Instrumentação Industrial**;Conceitos, Aplicações e Análises, 4.ed.São Paulo: Érica, 2002, 278p.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS – CETEC,2007.
Demanda Hídrica do limoeiro e do maracujeiro. 2007
Disponível em:
<http://sbrtv1.ibict.br/upload/sbrt6480.pdf?PHPSESSID=eacfd0394bf9cff61879b31265f473ef> .
Acesso em: Dezembro 2007

GONÇALVES Jr, A.A., **Metrologia parte I**. Florianópolis: Laboratório de Metrologia; Departamento de Engenharia Mecânica; UFSC, 2002 , [s.n.t.]
Disponível em:
<http://www.unifenas.br/radiologia/biblioteca/METROLOGIA%20parte%20I.pdf>
Acesso em: Janeiro de 2008

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL – INMETRO, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA – ABNT, SOCIEDADE BRASILEIRA DE METROLOGIA – SBM, **Guia para a expressão da incerteza de medição**, 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT. 1998.120P.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL – INMETRO. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia**. 2ed. Brasília: SENAI/DN. 2000. 75p.

LIMA,W.P; FREIRE,O. **Evapotranspiração em plantações de Eucalipto e de Pinheiro e em vegetação herbácea natural**. IPEF, n.12, p.103-117,1976.

MANZIONE, R. L.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G ; MONTEIRO, A.M.; **Modelagem de incertezas na análise espaço-temporal dos níveis freáticos em uma bacia hidrográfica**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 42, p. 25-34, 2007

MARCELINO,T.H.; SHIRAIWA, S.; BORGES,W.R.; PRIANTE FILHO,N.; RAITER,F.; **GPR para verificação do nível d'água subterrânea em transição Floresta Amazônica e Cerrado**. AC.T.A. Amazônica. sl.:2005, v.35(3), p.367-374

MENDES SOBRINHO,J.A.C, **Medidas de evapotranspiração de referencia (ET_o) através de um tanque classe A modificado**. Recife:UFPE,1987. 57p. Tese de Mestrado

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Recursos Hídricos no Brasil**. 1998, Disponível em: http://pnrh.cnrh-srh.gov.br/volumes/docs/PNRH-volume_1.zip
Acesso em: Agosto de 2006

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Programa de Águas Subterrâneas, Brasília 2001
Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/srh/_arquivos/aguassub.zip
Acesso em: Julho de 2006

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Águas Subterrâneas. Um recurso a ser Conhecido e protegido**, Brasília: 2007
Disponível em:
http://www.mma.gov.br/estruturas/srh/_arquivos/Cartilha_MMA_web_correto.pdf
acesso em: Janeiro de 2008.

MONTGOMERY,D.C.,RUNGER,G.C.,HUBELE,N.F.,**Estatística aplicada à Engenharia**, 2ed, Rio de Janeiro:LTC, 2004, 338p.

PORTO; R.L; ZAHED FLHO, K. **Notas de aula da disciplina Hidrologia Aplicada**; Escola Politécnica da USP, [198-], [s.n.t.]
Disponível em: http://143.107.96.240/phd/LeArq.aspx?id_arq=109
Acesso em: janeiro de 2008

RABELLO,L.M.;CRUVINEL,P.E.;DERNARDIN,J.E. **Linígrafo automatizado com microcontrolador**, Comunicado Técnico n.6, sl.: EMBRAPA,1996,4p.

WERNECK, M.W. **Transdutores e Interfaces**. Rio de Janeiro: LTC, 1996, 225p.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K.S., **Física**, v.3, 3ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004, v.3, 377p

HAYT Jr, W.; BUCK, J.A., **Eletromagnetismo**, 6ed., Rio de Janeiro: LTC, 2003 339p.

DURÃES, C.M.C. **Passo a passo para a redação e apresentação de trabalho acadêmico-científico**. Belo Horizonte, UFMG, faculdade de Farmácia. 2005
Disponível em: <http://www.farmacia.ufmg.br/biblioteca/passopasso.doc>
Acesso em: janeiro de 2008

PEREIRA, F. **Microcontroladores Família MSP 430 Teoria e prática**. São Paulo: Érica, 2005. 414p.

HAROWITZ, P.; HILL, W. **The art of Eletronics**, 2ed., Cambridge, 1989, p.1125.

EDMINISTER, J.A., **Circuitos elétricos**, 2ed. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1991

Texas Instruments. **MSP430x1xx Datasheet**. USA: Texas Instruments, 2004
Disponível em: <http://www.ti.com/lit/gpn/msp430f1491>

Texas Instruments. **MSP430x1xx User's Manual**. USA: Texas Instruments, 2004
Disponível em: <http://www.ti.com/litv/pdf/slau049f>

Texas Instruments. **MSP-FET430 Flash Emulation Tool User's Guide**. USA: Texas Instruments, 2004
Disponível em: <http://www.ti.com/litv/pdf/slau138i>

Texas Instruments. **Embebed Workbench Kickstart Version 4**. USA: Texas Instruments, 2007
Disponível em: <http://www.ti.com/litv/zip/slac050q>

APÊNDICE B: ANÁLISE DA AUTONOMIA DO SISTEMA

Uma preocupação em relação ao uso do sistema de medição objeto deste trabalho é o consumo de energia, uma vez que sua utilização é prevista para monitoramente em períodos relativamente longos. Usando um amperímetro em série com as baterias que alimentam o sistema e retirando a interface RS232 de operação ele apresentou um consumo de 480uA em repouso e 740uA na condição mais severa de operação, quando realiza leitura e armazenamento.

Na página eletrônica do INMETRO encontram-se dados relativos a ensaios feitos para determinar a capacidade de manutenção de corrente em pilhas alcalinas comerciais (disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/pilha.asp>). Estes ensaios mostram que estas pilhas, quando descarregadas durante 4 horas por uma resistência série de 3,90 Ω chegam, ao final deste tempo, com uma tensão entre terminais de 1,0V. Portanto pode-se afirmar que as pilhas são eficientes para manter durante 4 horas uma corrente elétrica entre os limites de 384mA, no início do tempo, a 231mA no final.

O sistema na condição de uso mais severa mostrou consumo de 740uA. Nesta condição ele poderia ficar em funcionamento contínuo por 52 dias que cada pilha garantiria uma tensão mínima maior que 1,0V, o que permitiria o armazenamento de 18720 leituras de nível. Como o sistema não trabalha direto na condição mais severa, a capacidade de corrente inicial das pilhas é bem maior que a tomada como referência para o cálculo acima e o fabricante garante que o microcontrolador pode ser alimentado com tensões de 1,8V a 3,3V pode-se afirmar que o sistema é eficiente para realizar as 5000 leituras estipuladas no trabalho.

APÊNDICE C: PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR MSP430F1491

Página 1/5

```
#include "msp430x14x.h"
;*****
; Medidor de nível
; Sensor tipo capacitivo
; Medição de capacitância através de leituras de pulso de clock durante período de
; descarga do componente sobre condições de limites de tensão pré-determinados e
; resistncia fixa
; tempo entre leituras de 60 segundos
; totalização de pulsos durante 1000 ciclos de descarga do sensor
;*****
RESET          RSEG  IDATA0          ;início de flash
               ASEG  01100h         ;início de RAM
               MOV   #0A00h,SP      ;início do apontador de pilha
               MOV   #WDTPW+WDTHTL,&WDTCTL ;desliga WatchDog
;*****
; Programa principal
; configuração e definição do modo de trabalho
;*****
               CALL  #SISTEMA_CLOCK ;configura sistema de clock
               CALL  #COMPARADOR    ;configura bloco comparador
               CALL  #PORTAS        ;configura portas de entrada/saída
               CALL  #APONTADORES   ;configura apontadores
               CALL  #TIMER_B        ;configura temporizador B
               CALL  #TIMER_A        ;configura temporizador A
               CALL  #INICIA_R8     ;configura o apontador de início de endereço
                                   ;para gravação em flash para continuação após
                                   ;ultima gravação quando de um reset
               EINT                  ;habilita interrupções quaisquer
VOLTA          BIS   #0010h,TBCTL    ;dispara Temporizador de tempo real
               BIS   #00D8h,SR      ;entra em sleep-mode (repouso)
               JMP   VOLTA
;*****
; interrupção da temporização
; Para sistema entrar em funcionamento após o tempo programado
;*****
TEMPO          DINT                  ; desabilita interrupções
               INC   R5              ; Multiplo do tempo da interrupção (10s)
               CMP   #6,R5          ; verifica 60 segundos
               JEQ   SEQUENCIA      ; se equivalente faz sequencia de leitura
               EINT                  ; habilita interrupções
               RETI                  ; se menor retorna da interrupção de leitura
;*****
SEQUENCIA     INC   R11              ;sequencia de leitura
               CLR   R7              ;limpa o contador de N° de ciclos de descarga
               CLR   R5              ;limpa o contador de múltiplos do tempo base
SEQUENCIA_1   CLR   R6              ;limpa o tempo de carga permanente do sensor
               BIS.B #0x80,P3DIR     ;configura o terminal 7 da porta 3 como saída
               BIS.B #0x80,P3OUT     ;coloca o terminal 7 da porta 3 em 1 para
                                   ; carregar o capacitor
T_CARGA       INC   R6              ;inicia o tempo de carga
               CMP   #1000,R6       ;verifica tempo de carga total alcançado
               JNE   T_CARGA        ;se diferente espera carrega total do capacitor
               BIC.B #0x80,P3DIR     ;configura 0 terminal 7 de P3 como entrada
                                   ;(alta impedância) para descarga do capacitor
               BIS.B #08h,CACTL1    ;dispara o comparador
               BIS   #0x0020,TACTL  ;dispara TA no modo de operação 1
ESPERA        BIT.B #0x01,CACTL2    ;verifica se valor de comparação foi alcançado
               JZ   ESPERA          ;se não espera. Quando alcançado prossegue
               BIC   #0x0020,TACTL  ;pára a totalização de pulsos do contador
               BIC.B #08h,CACTL1    ;desliga o comparador
               INC   R7              ;incrementa o contador de numero de ciclos
               CMP   #1000,R7       ;verifica contagem de 1000 ciclos
               JEQ   COPIA_TAR      ;se equivalente armazena valor totalizado
               JMP   SEQUENCIA_1    ;se diferente repete novo ciclo de totalização
COPIA_TAR     CALL  #ESCREVE_FLASH  ;chama subrotina para escrita em memória Flash
               INCD  R8              ;incrementa ponteiro de endereço de memória
                                   ;e contador do número de dados armazenados
```


Página 3/5

```

RRA      R9      ; roda o byte armazenado em R9 uma posição à direita
           ; (1ª etapa da operação para trocar de posição os
           ; 4 MSB R9 para a posição dos 4 LSB_ operação ;realizada bit
           ; a bit)
RRA      R9      ; repete operação
RRA      R9      ; repete operação
RRA      R9      ; repete operação
RRA      R11     ; troca de posição os 4 bits MSB de R11 para a posição ;dos
           ; LSB
RRA      R11     ; repete operação
RRA      R11     ; repete operação
RRA      R11     ; repete operação
ADD.B    #30h,R8 ; codificação de um byte em ascii (somar 30H)
ADD.B    #30h,R9 ; codificação de um byte em ascii (somar 30H)
ADD.B    #30h,R10; codificação de um byte em ascii (somar 30H)
ADD.B    #30h,R11; codificação de um byte em ascii (somar 30H)
CMP.B    #3Ah,R8 ; verifica se número ou letra
JL       TESTA_OUTRO_1 ;se letra testa próximo
TESTA_OUTRO_1 ADD.B #7,R8 ;converte número. soma 7
CMP.B    #3Ah,R9 ;verifica se número ou letra
JL       TESTA_OUTRO_2 ;se letra testa próximo
TESTA_OUTRO_2 ADD.B #7,R9 ;converte número. soma 7
CMP.B    #3Ah,R10 ;verifica se número ou letra
JL       TESTA_OUTRO_3 ;se letra testa próximo
TESTA_OUTRO_3 ADD.B #7,R10 ;converte número. soma 7
CMP.B    #3Ah,R11 ;verifica se número ou letra
JL       CONVERTE_GERAL ;se letra converte para ascii
CONVERTE_GERAL ADD.B #7,R11 ;converte número. soma 7
CLR      R15     ;limpa R15
CLR      R13     ;limpa R13
MOV      R8,R15 ; carrega o conteúdo de R8 em R15
SWPB    R9      ; inverte o conteúdo de R9
BIS     R9,R15 ;transfere o conteúdo dos 8 MSB de R9 para R15
MOV     R10,R13 ; carrega o conteúdo de R10 em R11
SWPB    R11     ; inverte o conteúdo de R11
BIS     R11,R13 ;transfere o conteúdo dos 8 MSB de R11 para R13
POP     R11     ;reestabelece valor inicial de R11
POP     R10     ;reestabelece valor inicial de R11
POP     R9      ;reestabelece valor inicial de R11
POP     R8      ;reestabelece valor inicial de R11
POP     R5      ;reestabelece valor inicial de R11
RET
;*****
;Subrotina para transmissão de uma palavra
;*****
TRAN_HIPER
SWPB    R13     ;inverte os bytes de R13
MOV.B   R13,U0TXBUF ;escreve no buffer de transmissão da usart o ;byte
           ;mais significativo de R13
ESPERA_2 BIT.B #1,U0TCTL ;aguarda mensagem de transmissão concluída
JZ      ESPERA_2 ;aguarda
SWPB    R13     ;inverte os bytes de R13
MOV.B   R13,U0TXBUF ;escreve no buffer de transmissão da usart o ;byte
           ;menos significativo de R13
ESPERA_3 BIT.B #1,U0TCTL ;aguarda mensagem de transmissão concluída
JZ      ESPERA_3 ;aguarda
SWPB    R15     ;inverte os bytes de R15
MOV.B   R15,U0TXBUF ;escreve no buffer de transmissão da usart o ;byte
           ;mais significativo de R15
ESPERA_4 BIT.B #1,U0TCTL ;aguarda mensagem de transmissão concluída
JZ      ESPERA_4 ;aguarda
SWPB    R15     ;inverte os bytes de R15
MOV.B   R15,U0TXBUF ;escreve no buffer de transmissão da usart o ;byte
           ;menos significativo de R15
ESPERA_5 BIT.B #1,U0TCTL ;aguarda mensagem de transmissão concluída
JZ      ESPERA_5 ;aguarda
MOV.B   #32,U0TXBUF ;comanda espaço entre dados a transmitir
ESPERA_50 BIT.B #1,U0TCTL ;aguarda mensagem de transmissão concluída
JZ      ESPERA_50 ;aguarda
INC     R12     ;incrementa contador de palavras transmitida
CMP     #10,R12 ;verifica transmissão de 10 palavras
JEQ    MUDA_LINHA ;muda linha no hiperterminal
RET     ;retorna da subrotina de transmissão
MUDA_LINHA MOV.B #10,U0TXBUF ;muda linha de impressão no hiperterminal;

```

Página 4/5

```

ESPERA_6      BIT.B #1,U0TCTL      ;aguarda mensagem de transmissão concluída
              JZ      ESPERA_6      ;aguarda
              MOV.B #13,U0TXBUF     ;retorna o carro para a posição inicial
ESPERA_7      BIT.B #1,U0TCTL      ;aguarda mensagem de transmissão concluída
              JZ      ESPERA_7      ;aguarda
              CLR    R12             ;limpa contador de palavras por linha
              RET      ;retorna da subrotina de transmissão
;*****
;*****
;SUBROTINA PARA AJUSTE DO PONTO INICIAL DE ESCRITA NO HYPERTERMINAL
;*****
AJUSTA_CARRO  MOV.B #10,U0TXBUF     ;muda linha de impressão no hiperterminal;
ESPERA_60     BIT.B #1,U0TCTL      ;aguarda mensagem de transmissão concluída
              JZ      ESPERA_60     ;aguarda
              MOV.B #13,U0TXBUF     ;retorna o carro para a posição inicial
ESPERA_70     BIT.B #1,U0TCTL      ;aguarda mensagem de transmissão concluída
              JZ      ESPERA_70     ;aguarda
              RET      ;retorna da subrotina de configuração do carro
;*****
;SUBROTINA AJUSTA USART
;*****
AJUSTA_USART  BIS.B #0x30,P3SEL     ; configura os terminais 4 e 5 de P3 para
              ; uso com o periférico USART (função auxiliar)
              MOV.B #0x11,U0CTL     ; configura usart para 8 bits e em reset
              BIC.B #0x01,U0CTL     ; habilita usart a transmitir (apaga o reset)
              MOV.B #0x00,U0RCTL    ; configura buffer de recepção da usart
              BIS.B #0x10,U0TCTL    ; configura o buffer de transmissão da usart
              MOV.B #0x4A,U0MCTL    ;Configura o modulador de clock da usart
              MOV.B #0x03,U0BR0     ;Configura o modulador de clock da usart
              MOV.B #0x00,U0BR1     ;Configura o modulador de clock da usart
              BIS.B #0xC0,ME1       ;habilita a usart0 a transmitir e receber
ESPERA_1      BIT.B #1,U0TCTL      ;aguarda mensagem de transmissão concluída
              JZ      ESPERA_1      ;aguarda
              RET      ;retorna da configuração de usart
;*****
;SUBROTINAS DE CONFIGURAÇÃO
;*****
APONTADORES
              MOV #0,R5             ;fator multiplicativo do tempo entre medições
              MOV #0,R6             ;tempo de carga do sensor
              MOV #0,R7             ;número de pulsos de descarga do sensor
              MOV #0,R10            ;limpa R10 (posição inicial irrelevante)
              MOV #0,R11            ;limpa R10 (posição inicial irrelevante)
              MOV #0,R12            ;limpa R12 (posição inicial irrelevante)
              MOV #0,R13            ;limpa R13 (posição inicial irrelevante)
              MOV #0,R15            ;limpa R15 (posição inicial irrelevante)
              RET
;*****
SISTEMA_CLOCK
              MOV.B #0x04,BCSCTL1   ;liga o oscilador de alta frequencia (4MHz)
              MOV.B #0x40,BCSCTL2   ;define a origem do clock auxiliar SMCLK como
              ;o cristal de alta frequencia e o oscilador de
              ;alta frequencia como ref para MCLK
              RET      ;retorna da subrotina de ajuste do sistema de ;clock
;*****
COMPARADOR
              MOV.B #0X30,CACTL1    ;conf entrada CA0 no terminal - do comparador
              ;com ref de 0,25% de VCC ligada à entrada
              ;não inversora e sem interrupção habilitada
              MOV.B #0X08,CACTL2    ;liga a entrada CA0 a entrada do comparador interno
              ;não habilita o filtro de saída
              RET      ;retorna da subrotina de ajuste do sistema de clock
;*****
PORTAS
              MOV.B #0xFF,P1DIR     ;configura todas as portas 1 como saída
              MOV.B #0xFF,P2DIR     ;configura todas as portas 2 como saída
              MOV.B #0xFF,P3DIR     ;configura todas as portas 3 como saída
              MOV.B #0xFF,P4DIR     ;configura todas as portas 4 como saída
              MOV.B #0xFF,P5DIR     ;configura todas as portas 5 como saída
              MOV.B #0xFF,P6DIR     ;configura todas as portas 6 como saída
              BIS.B #0x60,P5SEL     ;configura o terminal 5 da porta 5 como saída ;auxiliar

```

Página 5/5

```

BIS.B #0x04,P2SEL      ;configura o terminal 2 da porta 2 como saída ;auxiliar
                       ;(para disparar o timer A)
BIC.B #0x80,P3OUT     ;garante saída do terminal 7 de P3 em 0
BIC.B #0x10,P2DIR     ;configura o terminal 4 da porta 2 como entrada
                       ;(sinal de entrada do comparador)
BIS.B #0x10,P2SEL     ;configura o terminal 4 da porta 2 como ent ;auxiliar
BIC.B #0x40,P3OUT     ;coloca o terminal 6 da porta 3 em 0
BIC.B #0x01,P1DIR     ;configura o terminal 0 de P1 como entrada
BIC.B #0x01,P1SEL     ;configura o terminal 0 de P1 como entrada normal
BIS.B #0x01,P1IE      ;habilita o terminal 0 de P1 a gerar interrupção.
BIS.B #0x01,P1IES     ;interrupção ocorre na borda de descida
RET                   ;retorna da subrotina de ajuste de portas
;*****
TIMER_B
MOV #40960,TBCCR0     ;carrega em TBCCR0 com o valor ref de tempo
                       ;(4096 = 1s)
MOV #01C0h,TBCTL      ;para gerar uma interrupção a cada intervalo de 1s
                       ;configura TB para modo de operação 1, ACLK/8
                       ;sem interrupção de estouro de contagem habilitada
MOV #0x0010,TBCCTL0   ;habilita interrupção do canal 0 da função
                       ;captura compara de TB
RET                   ;retorna da subrotina de ajuste do timer B ;(referencia)
;*****
TIMER_A
MOV #0x0100,TACTL     ;configura TA para clock ACLK/1 parado
RET                   ;retorna da subrotina de ajuste do timer A ;(contador)
;*****
INICIA_R8
MOV #3000h,R8
VERIFICA_INICIO      CMP #0xFFFF,0(R8) ;verifica se é etapa de emulação ou de reset
                       ; se emulação conteúdo garantido como FFFF
                       ;se Reset conteúdo qualquer
                       JEQ VERIFICA_1
                       INCD R8 ;início do apontador de flash para preservar
                               ;ultimos dados armazenados mesmo quando de reset
VERIFICA_1           JMP VERIFICA_INICIO
                       CMP #0xFFFF,0(R8) ;verifica etapa de emulação (garantia)
                       JEQ VERIFICA_2
VERIFICA_2           JMP VERIFICA_INICIO
                       CMP #0xFFFF,0(R8) ;verifica etapa de emulação (garantia)
                       JEQ INICIO_FL
                       JMP VERIFICA_INICIO
INICIO_FL            RET ;retorna da subrotina de ajuste de R8
;*****
;configura vetores de interrupções
;*****
ORG 0FFE8h           ;vetor da interrupção do canal 0 da PORTA 1
DW DESCARREGA_DADOS ;nome da interrupção referente À porta 1
ORG 0FFFAh           ;vetor da interrupção do canal 0 do timer B
DW TEMPO            ;nome da interrupção referente ao vetor timer B
ORG 0FFFEh           ;vetor da interrupção de RESET
DW RESET            ;nome da interrupção referente ao vetor 0FFFEh
;*****
END                   ;FIM DE PROGRAMA

```

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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