



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AGRÍCOLA**

FRANCISCO JOSÉ FIRMINO CANAFISTULA

**Desenvolvimento, implementação e avaliação de uma estação
agrohidrometeorológica automática e sensores ambientais**

**SETEMBRO
2013**

FRANCISCO JOSÉ FIRMINO CANAFISTULA

**Desenvolvimento, implementação e avaliação de uma estação
agrohidrometeorológica automática e sensores ambientais**

Tese submetida à coordenação do curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Manejo de Bacias Hidrográficas do Semiárido.

Orientador: Prof. Adunias dos Santos Teixeira, PhD.

Coorientador: Prof. Dr. Ing. Sergio Daher.

Fortaleza

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- C220d** Canafistula, Francisco José Firmino.
Desenvolvimento, implantação e avaliação de uma estação agrohidrometeorológica automática e sensores ambientais / Francisco José Firmino Canafistula. – 2013.
138 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2013.
Área de Concentração: Manejo de Bacias Hidrográficas do Semiárido.
Orientação: Prof. Phd. Adunias dos Santos Teixeira.
Coorientação: Prof. Dr. Ing. Sérgio Daher.
1. Monitoramento ambiental. 2. Automação. 3. Instrumentação. I. Título.

FRANCISCO JOSÉ FIRMINO CANAFISTULA

**Desenvolvimento, implementação e avaliação de uma estação
agrohidrometeorológica automática e sensores ambientais**

Tese submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração Manejo de Bacias Hidrográficas.

Aprovada em 30/09/2013

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. Adunias dos Santos Teixeira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará-UFC

Prof. Dr. Ing. Sergio Daher (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará-UFC

Prof. Dr. Auzuir Ripardo de Alexandria
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará-IFCE

Prof^a. PhD. Eunice Maia de Andrade
Universidade Federal do Ceará-UFC

Dr. Rubens Sonsol Gondim - Pesquisador
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA

OFEREÇO

A meu pai Antônio Firmino Canafístula e minha mãe Maria de Jesus Canafístula (*In memoriam*)

Os problemas complexos são mais simples de resolver
do que problemas simples,
pois eles são feitos de problemas simples.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder o dom da vida.

À Universidade Federal do Ceará – UFC, especialmente ao Departamento de Engenharia Agrícola, por ter me dado a oportunidade de realização deste curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo financiamento do projeto de pesquisa intitulado “Desenvolvimento e implementação de estação agrohidrometeorológica automática e técnicas de calibração de sensores.

Ao Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola pela disponibilidade de instalações, ferramentas, instrumentos, material de consumo e componentes eletrônicos para realização desse projeto.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus de Iguatu-CE, pela disponibilidade de uma área experimental em Iguatu para instalação de instrumentos.

À equipe do Grupo de Pesquisa GAMA-DT pelo apoio na realização desse trabalho.

À equipe do Grupo de Pesquisa de Manejo de Solo e Água no Semiárido (MASSA) pelo apoio na realização desse trabalho.

Ao professor PhD. Adunias dos Santos Teixeira, pela oportunidade dada e ajuda inestimável.

Ao professor Dr. Ing. Sérgio Daher, pelo incentivo, por idéias e sugestões no desenvolvimento dos instrumentos.

Ao professor Dr. Auzuir Ripardo de Alexandria, pelas contribuições dadas nessa tese.

À professora PhD. Eunice Maia de Andrade, pela a confiança e oportunidade de realizar esse projeto.

Ao Dr. Rubens Sonsol Gondim, pelas contribuições dadas nessa tese.

Ao amigo maranguapence Luíz Alberto de Andrade Júnior pelo incentivo e ajuda inestimável no desenvolvimento do texto da tese.

A professora Dr. Helba Araújo de Queiroz Palácio, pela receptividade durante os momentos de trabalho no campo experimental.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola da UFC.

Ao professor Dr. Thales Vinícius de Araújo Viana, pela concessão de instrumentos para realização de ensaios experimentais.

À amiga Nílvia Nara Lucena pela ajuda na calibração e montagem de instrumentos em campo.

Aos amigos Júlio Cesar e Joseilson , pelo o acompanhamento do desempenho dos instrumentos no campo experimental.

Aos companheiros de trabalho no laboratório, Alípio, Lúcio, Tadeu, Eurileny, Watila, Ronei, Odílio, Alfredo, Thiago, Henrique, Joaquim, pela ajuda no desenvolvimento de softwares, instrumentos e procedimentos metodológicos no laboratório, além de excelentes sugestões.

Aos companheiros no campo experimental, Junior, Paulilo e Dirceu pela colaboração no acompanhamento do desempenho dos equipamentos.

A todos aqueles que contribuíram de forma direta e indireta para que esse experimento fosse realizado.

Meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

O acesso ao recurso hídrico gera conflitos em todas as regiões do mundo. Com o aumento do consumo e da escassez da água, a tendência é aumentar a insegurança hídrica e os conflitos. Por conseguinte, é fundamental e necessária a geração de ferramentas, instrumentos e metodologias de medição que aumentem a consistência dos estudos e a eficiência do gerenciamento desse recurso. O desenvolvimento tecnológico de um sistema de coleta automática e armazenamento de dados meteorológicos e hidrológicos é apresentado neste trabalho. O trabalho também descreve o desenvolvimento, metodologia de calibração, instalação e avaliação do funcionamento em campo experimental de sensores com características especiais. O foco do desenvolvimento e avaliação dos sensores é para atender às incertezas das variações espaço temporal de dados meteorológicos e hidrológicos do semiárido nordestino. Buscou-se na tecnologia de microcontroladores o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados, em decorrência da gama de arquiteturas disponíveis a baixo custo. Parte dos sensores desenvolvidos vem da tecnologia de transdutores industriais com base em semicondutores. A dimensão do valor da constante dielétrica da água, aliada ao modelo de funcionamento dos capacitores produziu também transdutores presentes neste trabalho. Foi possível fazer a medição e o armazenamento de dados ambientais de microbacias presentes no semiárido e assim apresentar a relação entre eventos meteorológicos (medidas pluviométricas) e hidrológicos (vazão de cursos de 1ª ordem no (picos de descarga) semiárido. Umidade relativa do ar, temperatura do ar, temperatura do solo e umidade do solo também tiveram seus valores monitorados pelas sondas desenvolvidas. Testar os instrumentos é necessário, pois permite aperfeiçoar a precisão e a robustez do sistema. Os dados obtidos pelo sistema permitiram a construção de hidrogramas das microbacias. O canal de comunicação dos sistema foi eficiente na coleta de dados, entretanto, faz-se necessário estabelecer vias alternativas de conectividade, para obter uma melhor avaliação e manutenção do sistema. A investigação de desempenho do pluviômetro capacitivo automático no laboratório e em campo demonstrou a capacidade do instrumento em medir todos os parâmetros da precipitação pluvial. Eventos com 0,7 mm de lâmina podem ser mensurados, inclusive a intensidade da precipitação.

Palavras-chaves: Monitoramento ambiental. Automação. Instrumentação.

ABSTRACT

Access to water resources creates conflicts in all regions of the world. With the increase in consumption and water scarcity, the tendency is to increase water insecurity and conflict, therefore it is essential and necessary to develop tools, instruments and measurement methodologies that increase the efficiency and consistency of studies of the management of this resource. The technological development of a system for automatic collection and storage of meteorological and hydrological data is presented in this thesis. The text also describes the development, methodology, calibration, installation and evaluation of operation, in the experimental field, of sensors with special features. The focus of the development and evaluation of the sensors is to meet the uncertainties of changing space-time weather data from the semi-arid Northeast. Sought in the microcontroller technology development system of data acquisition, because its range of architectures and the low costs. Part of the sensors has developed technology on based industrial transducers and semiconductors. The range of the value of the dielectric constant of water, coupled with the operating model of the capacitors also produced transducers in this work. It was possible to make the measurement and storage of environmental data from these micro-watersheds in the semiarid and thus present the relationship between weather events (rainfall) and hydrological (flow of courses in a second order semi-arid region). Relative humidity, air temperature, soil temperature and soil moisture values were also monitored by the probes developed. Test instruments is necessary because it allows improving the accuracy and robustness of the data obtained by the system. The system has allowed to the construction of hydrographs of micro-basins. The communication channel of the system was efficient in data collection, however, it is necessary to establish alternative means of connectivity for better evaluation and system maintenance. Research on performance of capacitive automatic rain gauge in laboratory and field demonstrated the ability of the instrument to measure all parameters of rainfall. Events with in 0.7 mm range can be measured, including rainfall intensity.

Keywords: Environmental monitoring. Automation. Instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Dificuldade de acesso à microbacia para coleta de dados.....	23
FIGURA 2 - SAD comercial com aplicação específica.....	29
FIGURA 3 - Sensor para conexão em SAD com aplicação específica.....	29
FIGURA 4 - SAD de alto desempenho.....	30
FIGURA 5 - Diagrama básico adotado no desenvolvimento dos equipamentos.....	33
FIGURA 6 – Algoritmo do programa de processamento do microcontrolador do SAD35	
FIGURA 7 – Topologia principal de conexão para o monitoramento das microbacias do campo experimental.....	37
FIGURA 8 - Componente eletrônico do sensor de umidade relativa do ar e temperatura.....	38
FIGURA 9 - Interface de comunicação entre PC e estação automática.....	40
FIGURA 10 - Componentes da estação automática.....	41
FIGURA 11 - Diagrama esquemático multifilar do circuito eletrônico proposto para estação.....	43
FIGURA 12 – Variação da temperatura do ar para o dia – coletado do SAD.....	45
FIGURA 13 – Variação da umidade relativa do ar para o dia – e coletado pelo SAD..	46
FIGURA 14 - Comparativo hidrológico sobre os parâmetros: lâmina escoada e volume escoado para as micro-bacias B1 e B2, para a estação chuvosa de 2009.....	47
FIGURA 15 - Diagrama de blocos da grade de sensores para avaliação de bulbo úmido.....	49
FIGURA 16 - Comparação ao bulbo real e ao gerado pelo programa <i>Golden Software Surfer</i>	50
FIGURA 17 - Mapa de umidade do solo depois da primeira irrigação nos tempos de: trinta minutos (1), três horas (2) e cinco horas (3).....	51
FIGURA 18 - Mapas de umidade do solo durante a segunda irrigação nos tempo de: dois minutos (1), cinco minutos (2), dez minutos (3), quinze minutos (4), vinte minutos (5), vinte e cinco minutos (6) e trinta minutos (7).....	51
FIGURA 19 - Mapas de umidade do solo após a segunda irrigação nos tempos de: cinco minutos (1), dez minutos (2), quinze minutos (3) e uma hora (4).....	52

FIGURA 20 - Diagrama de blocos do arranjo para calibração de sensores de umidade pelo método gravimétrico.....	53
FIGURA 21 - Radiação solar anual em Quixeramobim-CE.....	56
FIGURA 22 - Radiação solar anual em Florianópolis-SC.....	57
FIGURA 23 - Diagrama de blocos do sistema de provimento de energia do SAD.....	58
FIGURA 24 - Circuito eletrônico para fonte de alimentação de corrente contínua e carga de bateria.....	59
FIGURA 25 - Circuito eletrônico base para configuração de regulador de tensão LM 317.....	61
FIGURA 26 - Diagrama do circuito eletrônico do carregador de bateria com painel solar.....	62
FIGURA 27 - Nível obtido com dados monitorados por sensor de nível automático de pressão.....	64
FIGURA 28 - Planta baixa da calha Parshall.....	67
FIGURA 29 - Instalação de sensor de vazão (calha Parshall + linígrafo) com nível mínimo (a) e nível máximo (b).....	68
FIGURA 30 - Capacitor de nível de água com placas planas.....	68
FIGURA 31 - Gráfico de calibração do sensor de nível da coluna de água da calha Parshall da micro-bacia B1 (a) e da micro-bacia B2(b).....	72
FIGURA 32 - Precipitação, intensidade e descarga para o evento do dia 12 de março de 2008, na micro-bacia B2.....	74
FIGURA 33 - Seção transversal de um capacitor cilíndrico com raios R_1 e R_2	77
FIGURA 34 - Curva de calibração mostrando o comportamento da capacitância em relação à altura do nível de água.....	78
FIGURA 35 – a) Forma de onda com nível de água mínimo monitorado pelo sensor de placas planas; b) Forma de onda do sensor de placas planas monitorando o nível máximo de água; c) Forma de onda do sensor de placas concêntricas monitorando nível de água mínimo.....	79
FIGURA 35 – d) Forma de onda de frequência do sensor de nível de placas concêntricas monitorando nível de água máximo.....	80
FIGURA 36 – a) Forma de onda gerada pelo sensor com ruído gerado pelo contato externo na placa positiva; b) Forma de onda gerada pelo sensor utilizando placa concêntrica negativa externa.....	81

FIGURA 37 - Variação do sinal de saída do sensor de nível capacitivo com placas concêntricas em função da variação do nível de água.....	83
FIGURA 38 - Funcionamento do sensor de vazão no campo experimental.....	84
FIGURA 39 - Diagrama de blocos da bancada de ensaio de sensores de temperatura..	88
FIGURA 40 - Diagrama multifilar de conectividade dos sensores com o SAD.....	89
FIGURA 41 - Comparação de desempenho entre sensores de temperatura.....	91
FIGURA 42 - Avaliação da convergência à linearidade do sensor de Temperatura LM 35 com HMP 45C.....	92
FIGURA 43 - Variação da medição de temperatura com o tempo.....	93
FIGURA 44 - Tratamento discreto da divergência entre as medidas do sensores de temperatura.....	94
FIGURA 45 - Convergência de medidas de temperatura dos sensores após tratamento de software.....	94
FIGURA 46 - Estrutura do pluviômetro mecânico.....	98
FIGURA 47 - Pluviômetro de balança.....	99
FIGURA 48 - Pluviômetro capacitivo comercial.....	101
FIGURA 49 - Interferência do vento sobre trajetória da gota de chuva.....	103
FIGURA 50 - Detalhe da balança do Pluviômetro desenvolvido.....	104
FIGURA 51 - Resultados de testes efetuados com o pluviômetro de balança comercial.....	105
FIGURA 52 - Disposição das placas condutoras cilíndricas do pluviógrafo.....	106
FIGURA 53 - Desenho do projeto do pluviômetro com o recipiente de captação e placa de circuito impresso.....	108
FIGURA 54 - Calibração do Pluviômetro capacitivo.....	109
FIGURA 55 - Disposição dos instrumentos no laboratório.....	110
FIGURA 56 - Resposta dinâmica do pluviômetro automático capacitivo à precipitação pluvial com intensidade de 56,4 mm/h por 5 minutos.....	111
FIGURA 57 - - Monitoramento de precipitação pluvial, com intensidade de 56,4 mm/h, por 5 minutos, em pluviômetro automático capacitivo, com média dos dados de 1em 1 minuto.....	112
FIGURA 58 - Amostragem do monitoramento de precipitação pluvial com o inverso do sinal de frequência do pluviômetro capacitivo.....	113
FIGURA 59 - Tratamento com programa específico para melhor visualização dos dados monitorados.....	113

FIGURA 60 - Precipitação pluvial de 1,4 mm medida pelo pluviômetro capacitivo, em 22 julho de 2013, no município de Fortaleza-CE.....	114
FIGURA 61 – a) Gráfico dos dados de chuva com tratamento de planilha eletrônica; b) Gráfico da evolução do monitoramento de precipitação pluvial com a inversão dos dados de saída.....	116
FIGURA 62 - Registro de chuva de 2,49, mm medida pelo pluviômetro capacitivo, em 26 de julho de 2013, no município de Fortaleza-CE.....	118
FIGURA 63 - Evento de precipitação pluvial com lâmina de 10,87 mm medida pelo pluviômetro automático capacitivo.....	120
FIGURA 64 - Intempéries ambientais.....	122
FIGURA 65 - Água de pluviômetros poluídas por dejetos de pássaros.....	123
FIGURA 66 - Protótipo da placa de circuito impresso do carregador de bateria para painel fotovoltaico.....	137
FIGURA 67 – Montagem do SAD e PCI multifuncional e com furos metalizados.....	137

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Formato dos dados armazenados em banco de memória do SAD.....	45
TABELA 2 - Dados de entrada para calibração e validação de modelo básico de estudo de escoamento superficial.....	49
TABELA 3 - Constante dielétrica de algumas substâncias.....	70
TABELA 4 - Locais de instalação, equações e fatores de rejeição da coluna d'água da calha Parshall.....	71
TABELA 5 - Características hidrológicas da microbacia B2 para o ano de 2009:.....	74
TABELA 6 - Série de dados registrada por Gilbert White.....	96
TABELA 7 - Dados de análise de parâmetros da chuva de 22 julho de 2013 no município de Fortaleza.....	115
TABELA 8 - Dados de medição do peso da água de precipitação pluvial em campo..	119
TABELA 9 - Medição pluvial de postos da Funceme em 27 de julho de 2013.....	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALC	Altura da Lâmina de Chuva
CCA	Centro de Ciências Agrárias
EAFI	Escola Agrotécnica Federal de Iguatu
EN	El Niño
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DENA	Departamento de Engenharia Agrícola
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
LEMA	Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola
PCC	Pluviômetro Capacitivo de Placas Concêntricas
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
RC	Resistivo Capacitivo
SAD	Sistema de Aquisição de Dados
TFE	Tempo do Final do Evento
TIE	Tempo do Início do Evento
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
TT	Tempo Total do Evento
UCP	Unidade Central de Processamento
UFC	Universidade Federal do Ceará
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ	Constante Dielétrica
i	Intensidade da Precipitação Pluvial
μF	MicroFarad
V	Volt
W	Watt
nF	Nanofarad
π	Pi
ln	Logaritmo Neperiano
pF	Picofarad
ϵ_0	Permissividade do Vácuo

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	20
Hipóteses apresentadas no presente trabalho.....	24
Objetivos.....	24
1. DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (SAD) DE BAIXO CUSTO.....	27
1.1 Revisão de literatura.....	27
1.2 Desenvolvimento de Sistema de Aquisição de Dados e Sensores Eletrônicos.....	31
1.3 Atividades Realizadas em Laboratório.....	33
1.4 Programa do processador do SAD.....	34
1.5 Base de inovação da estação.....	36
1.6 Sensores da estação.....	37
1.7 Sensor de umidade relativa e temperatura do ar.....	38
1.8 Interface gráfica de coleta e armazenamento de dados.....	39
1.9 Testes Realizados no Campo.....	40
1.10 Contribuição científica da proposta.....	41
1.11 Resultados.....	42
1.11.1 Desenvolvimento e instalação de estação automática de coleta de dados ambientais com microcontrolador.....	43
1.11.2 Conectividade.....	44
1.11.3 Desempenho do SAD no campo experimental.....	45
1.11.4 Outros usos do SAD desenvolvido.....	46
1.11.4.1 Monitoramento de umidade do solo em microbacia.....	47
1.11.4.2 Avaliação de bulbo úmido em irrigação por gotejamento.....	49
1.11.4.3 Calibração de sensores no laboratório.....	52
1.12 Conclusões.....	53
2. DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA DA PCD.....	55
2.1 Introdução.....	55
2.2 Metodologia.....	57
2.3 Resultados.....	62
2.4 Conclusão.....	64
3. DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE VAZÃO AUTOMÁTICO APLICADO À MICROBACIAS DO SEMIÁRIDO.....	65
3.1 Introdução.....	65
3.2 Metodologia de desenvolvimento do sensor de vazão.....	66
3.3 Investigação da interferência da qualidade da água das microbacias na confiabilidade de medição do sensor.....	71
3.4 Resultados.....	72
3.5 Projeto e desenvolvimento de sensor de nível de placas concêntricas.....	76
3.6 Conclusão.....	84
4. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO SENSOR INDUSTRIAL NA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA COMO ALTERNATIVA AO SENSOR DE TEMPERATURA AMBIENTAL.....	86
4.1 Introdução.....	86

4.1.1	Metodologia de condicionamento e calibração de sensor industrial de temperatura para monitoramento ambiental.....	86
4.1.2	Especificações do sensor de temperatura usado em aplicações industriais.....	87
4.1.3	Especificações do sensor de temperatura ambiental.....	87
4.2	Resultados.....	90
4.3	Conclusões.....	95
5.	DESENVOLVIMENTO DE PLUVIÔMETROS PARA CARACTERIZAÇÃO DA PPT EM REGIÕES SEMIÁRIDAS.....	96
5.1	Revisão de literatura.....	96
5.1.1	Historia dos pluviômetros.....	96
5.1.2	Pluviômetros manuais.....	97
5.1.3	Pluviômetros mecânicos.....	97
5.1.4	Pluviômetros elétricos.....	98
5.1.5	Pluviômetros eletrônicos gravimétricos.....	99
5.1.6	Pluviômetros eletrônicos capacitivos.....	100
5.1.7	Erros de medição da precipitação pluvial dos pluviômetros.....	101
5.1.8	Densidade de postos pluviométricos.....	103
5.2	Metodologia de desenvolvimento de pluviômetros para as microbacias experimentais.....	106
5.2.1	Pluviômetro de balança.....	106
5.2.2	Desenvolvimento do pluviômetro capacitivo.....	106
5.2.3	Cálculo da capacitância do pluviógrafo.....	106
5.3	Resultados.....	109
5.3.1	Calibração do pluviômetro capacitivo.....	109
5.3.2	Validação do Instrumento em condição de precipitação artificial de alta intensidade.....	110
5.3.3	Validação do instrumento em condição de precipitação natural de baixa intensidade.....	114
5.3.4	Intercomparação entre medição dos pluviômetros manuais com pluviômetro capacitivo por intermédio do método gravimétrico.....	117
5.3.5	Investigação da convergência da medição do pluviômetro capacitivo com pluviômetro manual e posto de medição automática do serviço meteorológico local.....	119
5.3.6	Avaliação de custo do pluviógrafo capacitivo.....	121
5.3.7	Exemplo de intempéries ambientais atuantes no sistema.....	121
5.4	Conclusão.....	123
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	124
6.1	Conclusões.....	124
6.2	Recomendações.....	125
	BIBLIOGRAFIA.....	127
	APÊNDICE 1 - PUBLICAÇÕES ONDE FORAM USADOS DADOS OBTIDOS POR INTERMÉDIO DE INSTRUMENTAÇÃO DESENVOLVIDA NO PRESENTE TRABALHO.....	130
	APÊNDICE 2 – PCI.....	137

INTRODUÇÃO

“Medir é conhecer” é a frase preferida do matemático, astrônomo e astrólogo alemão, Johannes Kepler (1571 a 1630). O desenvolvimento de instrumentos e metodologias inovadoras de medição automática de variáveis associadas ao ciclo hidrológico é o foco principal desse trabalho, motivado pela importância de adição de conhecimentos para a conservação do recurso hídrico em regiões semiáridas. Atualmente, o direito à utilização da água gera conflitos em várias regiões do mundo. Segundo Kennett et al. (2012) os conflitos, guerras, migrações, morte e a fome por causa da escassez e mau gerenciamento de água já ocorreram em outra civilização antiga, politicamente organizada. A desintegração política da Civilização Maia ocorreu entre 1020 e 1100 dC, ocasionada por secas. A variabilidade climática na região dominada pela civilização Maia era controlada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e também com mudanças na frequência do *El Niño* (EN).

No semiárido da região nordeste brasileira, os eventos extremos de seca estão relacionados com o fenômeno *El Niño* e alterações na temperatura da superfície do mar (TSM), com mudanças no dipolo norte-sul e implicações na entrada da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no continente, responsável pela quadra chuvosa na região. Estas mudanças impactam diretamente no regime de precipitação, tanto qualitativamente como na sua distribuição da dimensão temporal, prejudicando o aporte de água nas bacias hidrográficas do bioma Caatinga. O estado do Ceará, sofre com os rigores da seca e os conflitos gerados por esses eventos extremos, pois está inserido por diversos fatores na região semiárida brasileira.

Portaria interministerial de 1º de março de 2008 indica que o estado do Ceará possui 86,8% de sua área inserida no semiárido brasileiro. Os critérios técnicos que nortearam essa delimitação foram os seguintes:

- a) Precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 mm;
- b) Índice de aridez de até 0,5 calculado pelo balanço hídrico que relaciona precipitações e a evapotranspiração potencial no período entre 1961 e 1990;
- c) Risco de seca maior que 60% tomando-se como base o período entre 1970 e 1990.

Muitos outros aspectos poderiam ainda caracterizar o Semiárido cearense, como sua vegetação predominante, a caatinga; solos rasos e assentados sobre o cristalino, dificultando a infiltração e, conseqüentemente a alimentação de aquíferos nos poucos

meses em que as precipitações ocorrem intensamente (SANTANA, 2011). A dificuldade é garantir água no bioma Caatinga. A invasão desse bioma é preocupante, pois gera a desertificação e a degradação, dificultando a captação de água pela caatinga. As mudanças climáticas e o aumento da temperatura virão contribuir com a desertificação. Os locais degradados vão ficar ainda piores, trazendo incertezas para o fornecimento regular de água para as capitais nordestinas, cuja a captação é no semiárido. Por conta dessas premissas, a reversão desse quadro desfavorável passa pelo conhecimento profundo do bioma em todos os seus aspectos (econômicos, sociais e ambientais), somente com um exaustivo conhecimento das características, limitações e recursos da região é possível promover o desenvolvimento sustentável do bioma. A automação do monitoramento e registro de dados desse meio ambiente pode contribuir de forma significativa para o aumento do conhecimento acerca do mesmo.

Automatizar a coleta de dados pode resultar em dados coletados com maior frequência, em intervalos regulares, e de forma mais consistente e objetiva. Conectando sensores para equipamentos de registro de dados permite-se que dados sejam coletados e registrados de maneira autônoma e com altas frequências de aquisição. Os dados precisam ser coletados sob condições adversas e durante momentos inoportunos, quando o acesso aos postos de medição é complexo e a disponibilidade humana é pequena. A automação nessa situação, evita a perda de dados ou lacunas durante períodos adversos.

Há disponibilidade de uma gama de tipos diferentes de instrumentos de coleta de dados e sensores ambientais, com características, capacidades e grande variação de custos. Começando com baixo custo, de pequena resolução, Sistemas de Aquisição de Dados (SAD) com entrada limitada, e terminando com instrumentos caros, de alta resolução, com entrada de dados para os mais diversos sinais gerados por diferentes sensores e portas de controle para atuadores. Há SADs especializados que recolhem tipos fixos de dados, tais como temperatura, umidade relativa do ar, níveis de luz, ou níveis de tensão. Estes SADs podem ter sensores genéricos ou podem utilizar sensores projetados especialmente para uso com esses SAD. Eles têm opções limitadas, que podem consistir apenas em definir o intervalo de coleta de dados. Estes dispositivos eletrônicos são geralmente destinados para uso como instrumentos eletrônicos de coleta passiva, capazes de medir um sinal de entrada, com capacidade limitada para enviar uma excitação ou sinal de controle para um sensor. Eles são simples de usar e estão disponíveis no mercado, a preços módicos.

O uso pretendido, o *layout* experimental, o ambiente e o orçamento podem ditar o tipo e/ou número de SADs necessários, e definir se o esforço de coleta de dados é viável ou não. Se muitos locais de medição devem ser monitorados, os pontos dos sensores devem estar perto o suficiente para o SAD coletar os sinais. Ligação dos sensores com fios longos devem ser evitadas. Fios longos podem degradar os sinais elétricos e os custos de fiação podem tornar-se proibitivos (CLARK et al.,1995). Se cada posto requer seu próprio SAD, o custo de muitas unidades pode exceder o orçamento de equipamentos.

Caso a programação do sensor ou o controle de um periférico sejam necessários ao projeto, SADs simples e de baixo custo podem não ter capacidade suficiente para realização dessas tarefas. Em algumas aplicações, os requisitos podem ser de tal ordem que um sistema comercial convencional pode não ser adequado, seja por razões funcionais, econômicas ou outras. Pode ser necessário ou vantajoso desenvolver um sistema de medição dedicado com capacidades únicas ou atributos especiais. Recentes avanços no desempenho, facilidade de configuração, programação e custo de microcontroladores eletrônicos, sensores de semicondutores e outros componentes podem fornecer alternativas para aqueles que desejam automatizar o processo de coleta de dados para uma aplicação especial. O monitoramento automático de posição e temperatura de animais, monitoramento de fonte de energia alternativa peculiares a uma determinada região e monitoramento automático de vazão de riacho intermitentes em região de difícil acesso, podem ser enumerados como exemplos a estas aplicações.

A escolha dos equipamentos para monitorar, coletar e avaliar dados depende das características do local onde serão realizadas as amostras e de seus objetivos, (FAO, 1997). É senso comum que a caatinga é um bioma único no mundo, e apresenta características especiais. A falta de sensores adaptados a essas condições e com preços acessíveis, incapacitou a instalação de equipamentos capazes de extrair amostras de alta frequência do sistema e assim viabilizar pesquisas com maior refinamento. Os sensores utilizados atualmente podem chegar a R\$ 20 mil por unidade, sendo a maioria importada.

Os SAD's são geralmente instalados em locais de difícil acesso, exigindo dos sensores que os constituem, certa confiabilidade na robustez para redução de visitas de manutenção corretivas e preventivas, que nas convencionais são necessárias para a garantia do funcionamento contínuo do sistema e integridade dos dados. No semiárido, a dificuldade de acesso aos postos de medição das microbacias é justamente no

momento de ocorrência dos eventos mais importantes. São chuvas torrenciais que trazem grande dificuldade de acesso às diversas áreas com pouca infraestrutura de estradas (Figura 1).

Figura 1 - Dificuldade de acesso à microbacia para coleta de dados.



Fonte: Alves, 2008.

A aquisição de tecnologia importada acarreta transtornos, notadamente aos pesquisadores, podem ser citados: custo elevado, dificuldade de assistência técnica, falta de peças de reposição, carência de pessoal qualificado para operação de equipamentos etc. Não obstante, a robustez dos equipamentos forâneos para monitoramento ambiental, esses equipamentos demandam manutenção devido à sensibilidade de sensores, à técnica de instalar e calibrar, necessitando de pessoal qualificado que nem sempre está disponível, prejudicando a coleta de dados e assim inviabilizando análises importantes no transcorrer de uma pesquisa científica. Por conseguinte, dificultando a avaliação das características hidrológicas e meteorológicas no semiárido, que necessitam de informações de vários anos de dados para produzir resultados fidedignos.

Projetar sensores mais robustos, com custo acessível, capazes de medir dados como temperatura, umidade, vazão de pequenos cursos e precipitação, é essencial para possibilitar o monitoramento ambiental do semiárido. Além disso, existem várias instituições e setores produtivos que necessitam obter informações regulares coletadas em lugares remotos e em várias estações distribuídas em grandes áreas de interesse. As variáveis meteorológicas tais como: Temperatura, Velocidade e Direção dos Ventos, Umidade Relativa do Ar, Radiação Solar, Pressão e Índices Pluviométricos são as informações que podem ser disponibilizadas a um grande número de usuários por uma Plataforma de Coleta de Dados (PCD) ou SAD.

O desenvolvimento de instrumental de medição e registro aplicado contribui para o estabelecimento de uma base consistente de dados, a qual permite a grupos de pesquisas realizar diversos estudos e formação de pessoal especializado, contribuindo assim para o entendimento dos processos hidrológicos no semiárido brasileiro.

Hipóteses apresentadas no presente trabalho

1. Altas vazões (rios perenes ou perenizados), micro vazões (instrumental médico) e vazões em condutos fechados encontram diversidade de instrumentos e métodos para sua medição automática, entretanto pequenos cursos d'água regidos pela irregularidade dos eventos são carentes de instrumentos automáticos de medição de sua vazão. Por conseguinte, utilizando calhas Parshal com sensor de nível capacitivo pode-se caracterizar a vazão de pequenos cursos d'água no semiárido.
2. O instrumental de medição automática existente não atende de forma precisa a medição e registro dos parâmetros dos eventos de chuva, como eventos de baixa intensidade e curta duração. Com o desenvolvimento de um pluviógrafo automático baseado em uma nova concepção de transdutor, pode-se caracterizar precipitações de baixa intensidade e pequeno período de duração.

Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é o desenvolvimento, calibração, implantação e avaliação de uma estação agrometeorológica automática a ser instalada em bacias e microbacias hidrográficas do semiárido brasileiro e diversos

sensores para medir grandezas físicas de interesse dos pesquisadores atuantes na região semiárida.

Como objetivos específicos o projeto busca:

1. Desenvolver um sensor eletrônico de vazão de alta precisão adaptado à atividade de monitoramento de curso d'água intermitente de pequena vazão em micro bacia hidrográfica do semiárido e técnica de calibração;
2. Condicionar um sensor de umidade relativa do ar e técnica de calibração;
3. Condicionar um sensor de temperatura do ar e técnica de calibração;
4. Condicionar um sensor de precisão para a temperatura do solo e técnica de calibração;
5. Desenvolver um pluviógrafo automático tipo balança e técnica de calibração;
6. Desenvolver um pluviógrafo automático de precisão com base na teoria do capacitor com cilindros concêntricos;
7. Monitorar a umidade do solo com sensor capacitivo de umidade do solo em meios porosos, desenvolvido em laboratório do departamento da Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará;
8. Coletar dados da estação estabelecida com um computador e módulo específico para esse fim, além da *Internet*. Coleta por meio de RS232;
9. Desenvolver um controlador de carga por intermédio de painel solar usando técnica de seguidor de máxima potência em microprocessador de baixo custo;
10. Desenvolver um SAD.

Esta tese está dividida em seis capítulos, sendo um referente ao desenvolvimento do SAD e os seguintes ao desenvolvimento do sistema de energia e sensores ambientais aplicados. Todos os capítulos são tratados de forma isolada, contendo introdução, metodologia, resultados e conclusões. Ao final é mostrada uma conclusão geral do trabalho. O Capítulo 1 aborda o desenvolvimento do SAD, sua instalação no campo experimental e outras aplicações do sistema em campo ou em laboratório como sistema de monitoramento em calibrações de sensores. O Capítulo 2 transcreve os resultados, desenvolvimento e o suas diversas aplicações do sistema de gerenciamento de energia. Sensores industriais foram condicionados para monitorar variáveis ambientais no presente trabalho. O Capítulo 3, por sua vez, apresenta a metodologia detalhada para o condicionamento do sensor de temperatura do solo. O desenvolvimento do sensor de vazão é o assunto do capítulo 4. No capítulo 5, é tratado o desenvolvimento dos

pluviógrafos. Finalmente, no capítulo 6 são feitas as considerações finais, onde são apresentadas as conclusões e recomendações.

1. DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE BAIXO CUSTO

1.1. Revisão de literatura

As PCD's ou SAD surgiram dos problemas de erros de aquisição e registro de dados. Uma das dificuldades encontradas em medidas de variáveis ambientais é o registro das informações obtidas em campo. O registro de dados de forma automática possibilita, entre as principais vantagens, a eliminação de erros humanos na leitura de sensores: erros de digitação, erros de paralaxe, perda de dados, sincronismo de leitura entre vários instrumentos e frequência de leitura com intervalos precisos. As desvantagens desses instrumentos são: custo de aquisição da tecnologia, falta de pessoal qualificado para manutenção e instalação em regiões subdesenvolvidas. A necessidade de pessoal qualificado e treinado para a coleta de dados e a dificuldade na reposição de peças sobressalentes também dificultam a medição e o registro de dados em regiões em desenvolvimento.

Os primeiros registradores de dados foram mecânicos, sendo efetuados os registros através de papéis, como os encontrados em sismógrafos. Uma pena se desloca no eixo da intensidade variável a ser medida e o papel gira no sentido ortogonal, de forma a obter um registro gráfico da variável no tempo.

Com o desenvolvimento da Eletrônica, esses registradores foram evoluindo, tendo sido incorporados, inicialmente, acionadores de penas eletrônicos e posteriormente surgiram modelos em que os registros eram efetuados em fitas magnéticas. Nesse período, o grande desafio, para o uso em campo era melhorar o meio de proteger o equipamento contra as intempéries e torná-lo portátil (XXVII CONBEA, 1998).

Com o advento da microeletrônica, em especial dos microprocessadores digitais, a redução das dimensões se torna viável. Com o crescimento vertiginoso do uso de microprocessadores, o custo se reduziu consideravelmente, permitindo a sua aplicação em equipamentos de leitura e armazenamento de dados em campo, incorporando novas funções, como a comunicação direta com o computador, o que eliminou os erros decorrentes da digitação na passagens de dados.

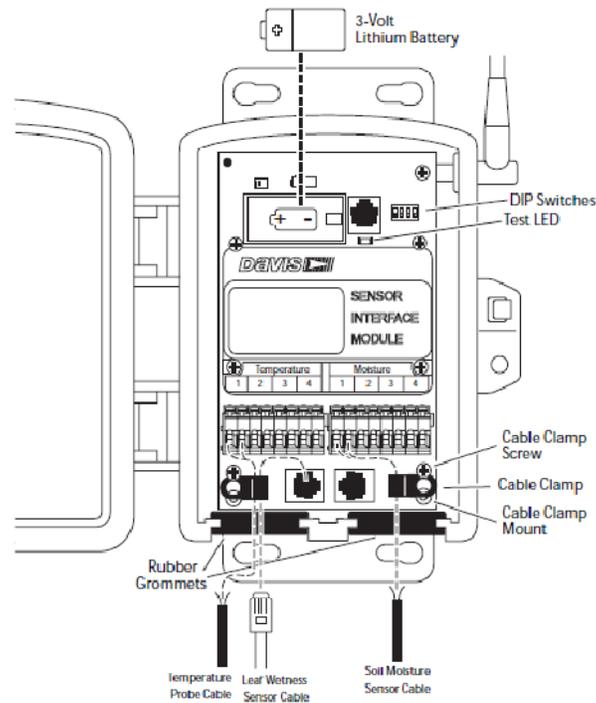
As características principais para que um equipamento microprocessado portátil possa atuar em campo, incluindo-se máquinas agrícolas, são ditadas pela condição em

que o equipamento irá trabalhar. As condições de campo são adversas podendo-se citar: grandes distâncias e variabilidade espacial; grandes variações da umidade relativa do ar; oscilações de temperatura; presença de orvalho, poeiras, ventos fortes, raios solares, fungos, insetos, pequenos lagartos e outros animais no interior do equipamento; possibilidades de fortes chuvas e granizo; indução de altas tensões no circuito eletrônico por intermédio de descargas elétricas atmosféricas; afundamento de tensão da rede elétrica; picos de tensão da rede; qualidade de mão-de-obra e presença de vibração.

Segundo Fisher et al. (2003), a coleta manual de dados em campo e de laboratório pode ser um processo demorado, trabalhoso e oneroso. O tempo necessário para coletar dados de um local no campo inclui não só o período gasto fazendo as medições, mas o tempo necessário para viajar do laboratório ao campo. O tempo necessário para coletar dados pode resultar em medidas menos frequentes ou demandar mais trabalho se as medições de maior frequência forem imprescindíveis. Lacunas na série de dados podem surgir, quando não é possível executar o serviço de coleta de dados, como nos fins de semana ou feriados, ou quando o local da coleta de dados não pode ser alcançado, devido ao mau tempo. Uma baixa frequência de coleta de dados, como uma vez por dia, por exemplo, pode resultar em lacunas do processo em estudo. Ocorrendo eventos entre esse intervalo, podem passar despercebidos, e assim a informação não será registrada.

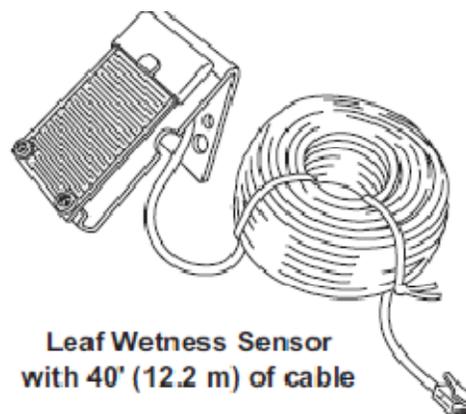
Um modelo comercial de SAD é apresentado na Figura 2 (DAVIS INC., 2009) nesse modelo em particular, um tipo de sensor específico é usado na estação (Figura 3). Tendo o conector (RJ45) do sensor já dedicado para este modelo. O custo atual desse modelo, segundo o fabricante, é em torno de U\$ 250,00, no entanto esse valor para usuários aqui no Brasil custa em torno de R\$ 10.000,00, em decorrência das taxas de importação e margem de garantia dos representantes.

Figura 2 – SAD comercial com aplicação específica



Fonte: Davis Inc (www.davisnet.com).

Figura 3 – Sensor para conexão em SAD com aplicação específica



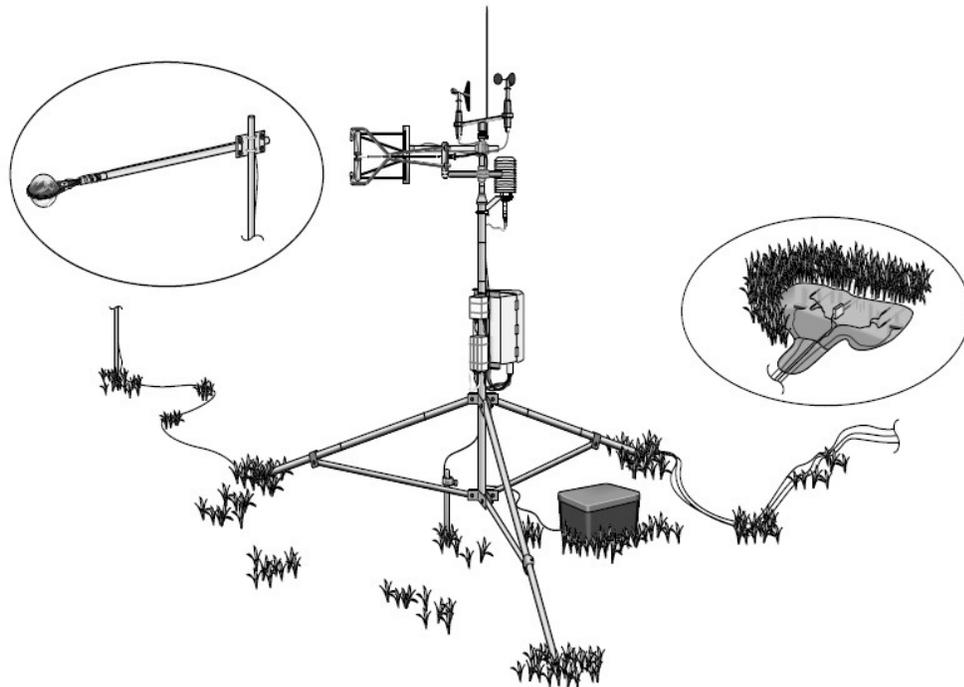
Fonte: Davis Inc. (www.davisnet.com).

SADs com vias multifuncionais disponíveis podem ler as entradas a partir do sinal de uma grande variedade de tipos de sensores. Estes instrumentos oferecem uma série de opções de leitura de sinal de entrada (amplitude de tensão elétrica variável,

diferença de potencial elétrico com referência comum para o aterramento ou diferenciais), analógico, capacidade de leitura de sinal digital e geração de sinais de controle (para controlar um sensor ou atuador). Estes dispositivos eletrônicos também são capazes de ter conectividade com equipamentos periféricos, como rádios, modems e outros dispositivos externos. Estas unidades são muito mais flexíveis e podem ser programadas para intervalos de medição personalizados, tomada de decisão, fazer em tempo real cálculo e conversão de unidades. Uma característica ainda pouco explorada desses SADs é o comando e as funções de controle de sensores e principalmente atuadores. Estes sistemas oferecem uma quase ilimitada capacidade e podem custar vários milhares de dólares.

A Figura 4 apresenta um SAD de alto desempenho, o qual pode monitorar, controlar e registrar diversos tipos de dados, indo além de um sistema de monitoramento ambiental, pois por meio de suas portas de controle, podem ser acionados atuadores diversos.

Figura 4 – SAD de alto desempenho



Fonte: Campbell Scientific Inc. (www.davisnet.com)

De acordo com Jucá et al. (2011), Sistemas de Aquisição de Dados (SAD) de baixo custo aplicados à plantas descentralizadas de energia renovável (RE) promovem o uso desse tipo de projeto, pois um custo menor permite uma maior disseminação dos instrumentos. Isso é relevante para o desenvolvimento de regiões pobres, pois permite o suprimento de energia à áreas rurais carentes desses recursos. Levando isso em conta, disseminar estações de monitoramento ambiental automático contribui para o desenvolvimento sustentável da região por conta da importância do conhecimento gerado e o suporte que este poderá oferecer na produção e conservação de água com qualidade.

Segundo Medeiros (2009), o adensamento de estações hidrológicas no semiárido brasileiro é imprescindível. Nessa região, os processos ocorrem de maneira pontual na dimensão espacial e na dimensão temporal, exigindo um elevado número de estações e com intervalos de medidas mais frequentes que o diário (praticado atualmente). Esse procedimento concorre para um correto entendimento de como funcionam esses processos. O conhecimento dos processos hidrológicos e de seus efeitos sobre diversos aspectos do meio ambiente é fundamental para a gestão de recursos hídricos, especialmente em uma região semiárida, habitada por uma população de 22.598.318 milhões de pessoas (MEDEIROS et al., 2012) e com escassez de recursos, onde uma gestão ineficiente pode resultar na falha ao atendimento de insumos básicos à sobrevivência.

1.2. Desenvolvimento de Sistemas de Aquisição de Dados e Sensores Eletrônicos

O recurso hídrico é o primeiro a se exaurir na região semiárida devido às irregularidades de chuvas no tempo e espaço, dessa maneira a necessidade de medição quantitativa desse recurso é uma premissa para o gerenciamento adequado desse importantíssimo recurso natural. Mensurar a vazão de um curso d'água no semiárido não é tarefa simples ou pouco onerosa, por conta das irregularidades e escassez das chuvas na dimensão espacial e temporal. A necessidade de aferir automaticamente, com baixo custo, a vazão de pequenos cursos de água é um desafio interessante. A automação da medição já é parte da solução por conta das irregularidades climáticas da região, por conseguinte a necessidade de usar microprocessadores e componentes eletrônicos de baixo custo direcionam para o uso de microcontroladores que são dispositivos eletrônicos que podem ser usados para aplicações específicas. A Eletrônica

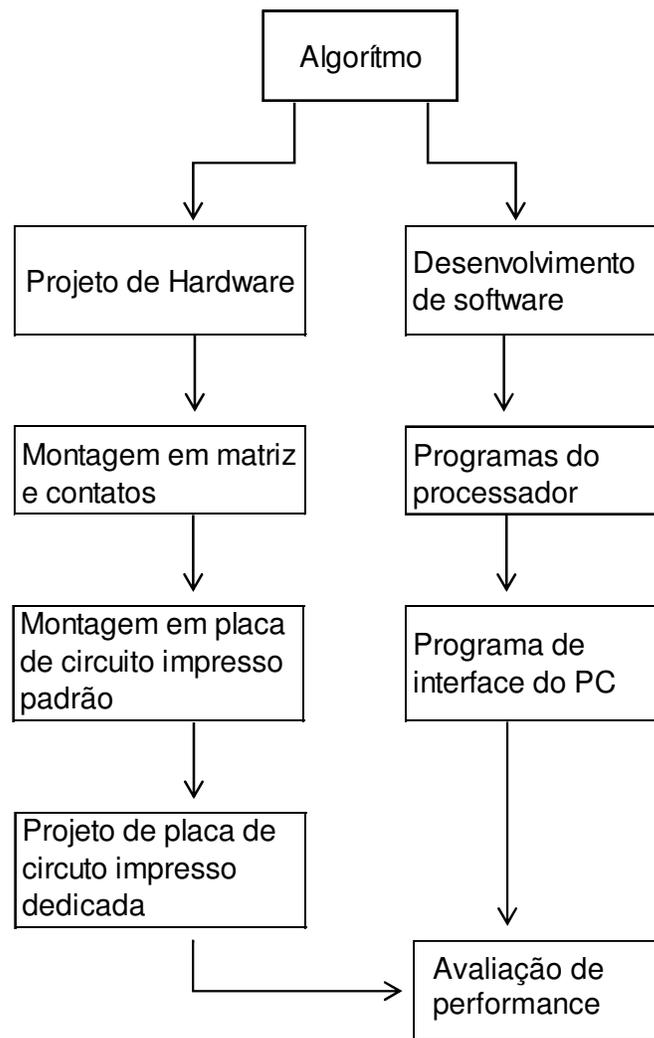
trouxe incremento tecnológico a todos os setores do desenvolvimento humano, com seus diversos componentes: transístores, capacitores, diodos, etc. Os componentes eletrônicos são integrados para o projeto de circuitos eletrônicos, com aplicações específicas, dentre os quais está o microcontrolador, que na verdade é uma associação de milhares de componentes eletrônicos básicos e que pode executar tarefas pré-determinadas por intermédio de programas com base em algoritmos. O microcontrolador é uma ferramenta poderosa e de baixo custo para a automação e controle de sistemas, pois com ele pode-se efetuar o controle de atuadores e aquisição de dados.

A metodologia de desenvolvimento da estação automática, do sistema de gerenciamento de carga da bateria e de alguns sensores que tem circuitos eletrônicos e microprocessadores pode ser resumida pelo diagrama da Figura 5. O uso dos microcontroladores e componentes eletrônicos no projeto de sistema de aquisição de dados de baixo custo aplicados na coleta de dados de sensores agrometeorológicos é a solução dada por esse trabalho de desenvolvimento, expressado pelo primeiro retângulo da Figura 5. O segundo quadro da figura 5 expressa os passos básicos necessários para a execução do projeto, programação e interligação do processador do SAD. Embora representado por um quadro, este representa o algoritmo do programa do microcontrolador e o algoritmo do projeto do circuito eletrônico. Ressaltando que o projeto de circuitos eletrônicos, antes de passar para o teste em matriz de contatos, passará por simuladores computacionais para detecção de eventuais falhas.

O programa de interface gráfica é parte essencial no projeto, com a utilização dessa ferramenta, o usuário poderá coletar e avaliar os dados. É nesse sistema que podem ser feitos os cálculos e as conversões de dados em hexadecimal para valores de variáveis monitoradas.

A avaliação de desempenho dos equipamentos e *software* foi realizada no laboratório e no campo experimental, procurando refinar ao máximo sua eficiência. Essa performance passa não só pela robustez do circuito eletrônico e integridade dos programas do sistema, mas também pela acessibilidade e portabilidade de uso do instrumental desenvolvido. A avaliação de funcionamento dos equipamentos em campo tem grande importância, pois geralmente a demanda de manutenção ocorre por fatores relacionados ao meio ambiente.

Figura 5 – Diagrama básico adotado no desenvolvimento dos equipamentos



Fonte: Autor.

1.3. Atividades Realizadas em Laboratório

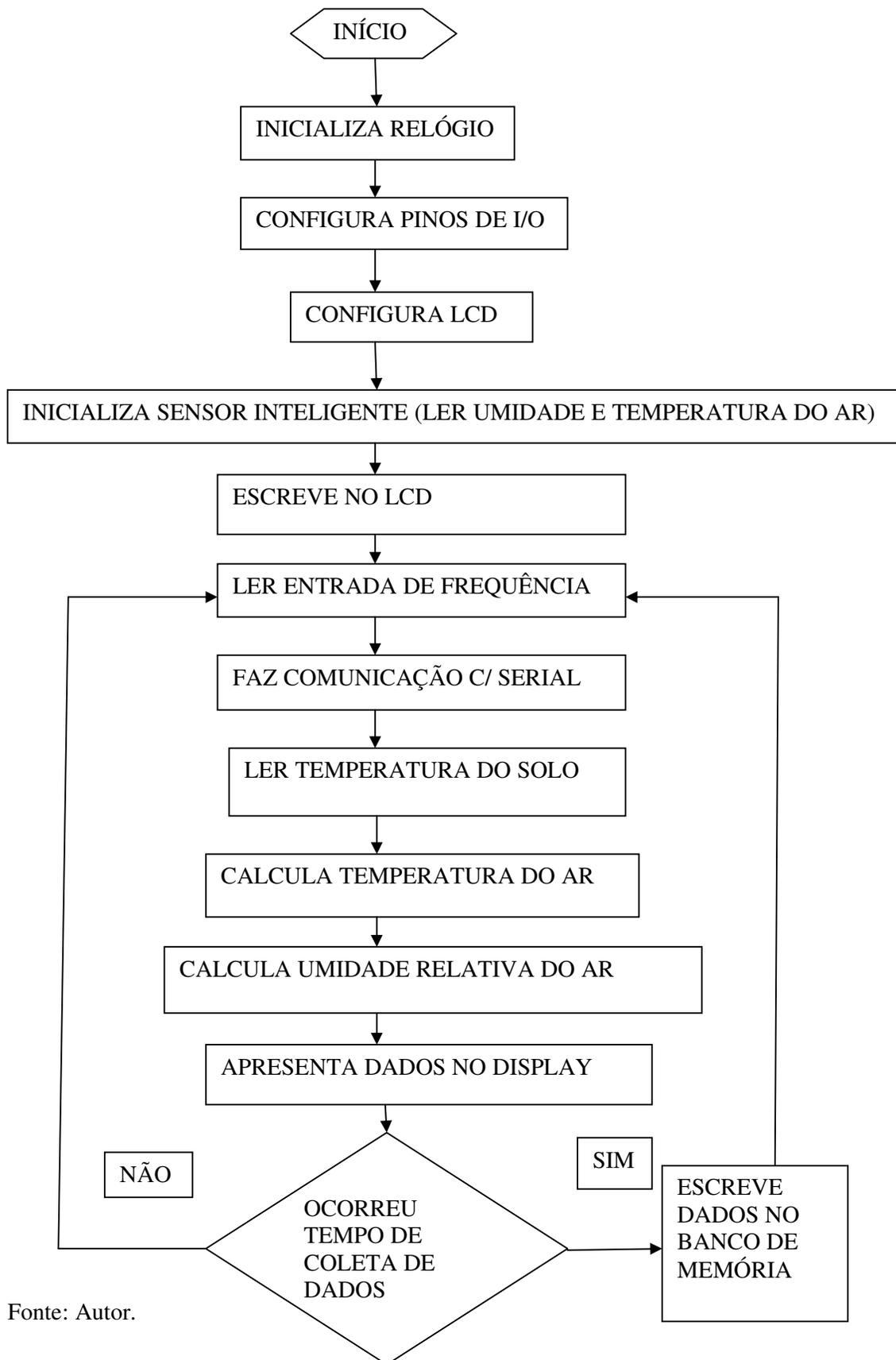
A Estação automática foi desenvolvida e calibrada pelo Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA) do Departamento da Engenharia Agrícola (DENA) do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Uma placa de circuito impresso faz o monitoramento e armazenamento dos dados usando um microcontrolador como processador de dados.

Os atuais microcontroladores possuem uma série de circuitos de interface (conversor analógico digital, relógio de tempo real, amplificador operacional, portas de comunicação etc.) em uma mesma plataforma, o que reduz a necessidade de diversos componentes externos, esta, por sua vez, deixa os circuitos mais compactos e mais resistentes à falhas. Um microcontrolador de 16 *bits* permite a conversão de dados analógicos para digital com a precisão e resolução necessária ao estudo da microbacia, bem como, implementação de um relógio de tempo real através de um dos *timer's* integrados ao seu circuito. A elaboração de relógios precisos é de grande importância no SDA, para determinação de data, hora, minuto, e segundo em que os dados foram coletados e registrados. O armazenamento de dados é feito através de um banco de memórias, para aquisições em intervalos de tempo definidos pelo usuário. Esse banco pode armazenar dados durante vários meses. Para parametrização e coleta de dados foi utilizado um sistema de comunicação serial entre a estação e um computador.

1.4. Programa do processador do SAD

O microcontrolador é um processador de dados, este dispositivo necessita de um programa para ler e processar os dados enviados pelos sensores (*firmware*). O programa usado no microcontrolador foi desenvolvido no LEMA, na linguagem de programação C, e usando o compilador adequado às características de fabricação do componente, posteriormente convertido em uma linguagem de processamento de baixo nível, hexadecimal para que possa ser gravado no microcontrolador. A gravação do microcontrolador com o programa responsável por coletar e processar os dados foi realizada em um programador universal para microcontroladores, modelo BEEPROG. O algoritmo do programa que processa e armazena os dados no SAD é ilustrado na Figura 6. O início do processamento é dado quando se liga a placa de aquisição de dados a uma fonte de energia ou quando o botão *reset* é acionado.

Figura 6 – Algoritmo do programa de processamento do microcontrolador do SAD.



Fonte: Autor.

1.5. Base de inovação da estação

Os SAD's comerciais tem duas linhas principais de desenvolvimento. Há sistemas que trazem a possibilidade de ligar diversos sensores, ler tensões com precisão na ordem de milivolts, pulsos e até executar ação de controle em alto nível. Entretanto a sua programação exige conhecimento técnico específico e sua aquisição exige um aporte financeiro significativo. Na outra linha de desenvolvimento, a necessidade de recursos não é expressiva e a programação não é complexa, mas esses SADs precisam de sensores específicos e dedicados. Os SADs dessa linha de desenvolvimento só conseguem receber a conexão de sensores projetados e fabricados para eles. O SAD que foi desenvolvido é baseado em arquitetura de microcontroladores, e uma de suas principais características é a possibilidade de conexão de diversos sensores, tanto os de fabricação comercial como os específicos, além da leitura de tensões elétricas em milivoltes. A seguir, é dada a descrição das vias de acesso e exemplos de quais sensores podem ser conectados no SAD desenvolvido:

- **Via de conexão de tensão analógica do SAD:** Nesse conector podem ser ligados sensores que tenham saída analógica de tensão contínua, como piranômetros, termopares etc. O LM 35, depois de condicionado (protegido de forma adequada para funcionar no meio ambiente e feito a conexão de cabos aos seus terminais de ligação), foi usado para medição de temperatura do solo, sendo ligado nessa via de conexão do SAD.
- **Via de conexão para medição de frequência:** Essa via de acesso pode monitorar alta frequência. O monitoramento de sinal de um sensor de vazão, especialmente desenvolvido nesse trabalho, ocorre aqui, e com uma pequena reconfiguração na plataforma de programação do sistema, pode-se ler também um sensor de umidade do solo desenvolvido no LEMA. Nessa mesma via de conexão, também pode ser ligado um medidor automático capacitivo de precisão de índice pluviométrico desenvolvido neste trabalho.
- **Via de conexão para sensor inteligente:** Conexão especial para monitoramento de sensores com processamento interno de sinais. Nessa entrada há protocolo de comunicação do sensor com o SAD. Um sensor de temperatura e umidade relativa do ar de uso industrial foi condicionado para trabalhar nas intempéries do semiárido nordestino. O microcontrolador do SAD tem rotinas de programação específica para

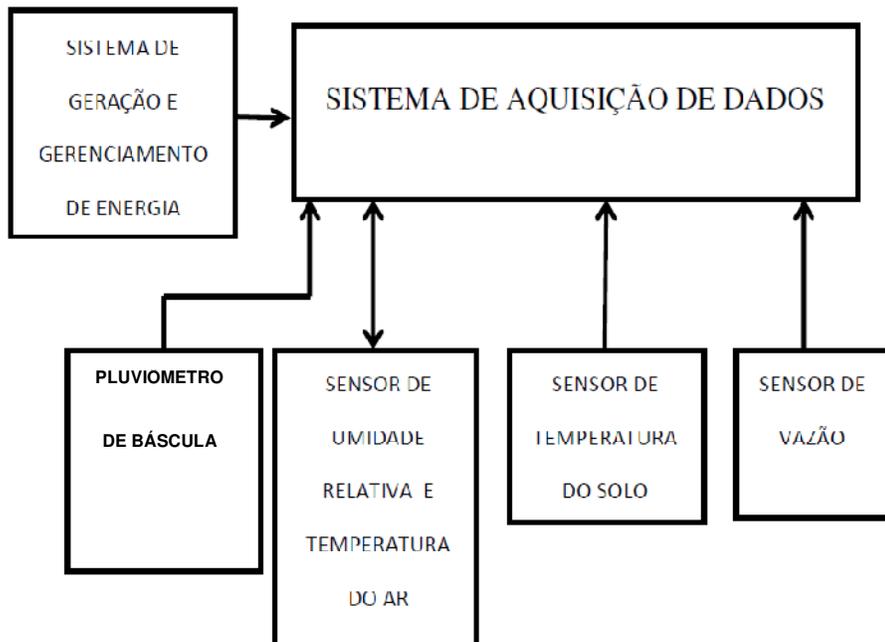
fazer a conexão inteligente com o sensor de temperatura e umidade relativa do ar STH7x.

- **Via de conexão de entrada para contagem de pulsos de baixa frequência:** Essa via permite a ligação para o monitoramento de pluviômetro de balança comerciais ou sensores que emitem pulsos em baixa frequência, como indutivos para monitoramento de velocidade e contagem.

1.6. Sensores da estação

A topologia principal da conexão de sensores, que foram ligados para o monitoramento no SAD foi baseada na necessidade de medição de variáveis estudadas nas microbacias do semiárido do Nordeste brasileiro. A Figura 7 ilustra essa topologia por meio de diagrama de blocos. Todos os sensores da estação foram adaptados, desenvolvidos e calibrados no LEMA. O caráter inovador do sensor de vazão e do pluviômetro capacitivo automático, dadas suas importâncias no estudo da dinâmica da microbacia, serão avaliadas em capítulo à parte.

Figura 7 – Topologia principal de conexão do SAD e sensores, para o monitoramento das microbacias do campo experimental.

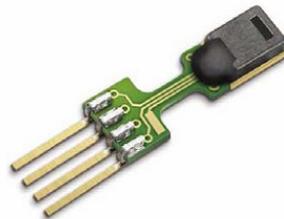


Fonte: Autor

1.7. Sensor de umidade relativa e temperatura do ar

O sensor de umidade e temperatura do ar é o modelo SHT7x (Figura 8). Este sensor é feito de um polímero de cristal líquido, encapsulado em *epoxy*. O sensor é fabricado baseado em tecnologia inteligente CMOS, há um processador interno que converte os sinais de saída analógica de um sensor de temperatura e um sensor de umidade relativa do ar em saída digital (SENSIRION THE SENSOR COMPANY, 2003). Para a leitura das grandezas monitorada pelo sensor foi necessário o desenvolvimento de um *software* específico embarcado no processador da estação que estabelece a comunicação com o processador do sensor. Esse sensor é usado em equipamentos industriais, para que esse instrumento seja utilizado no meio ambiente é necessário dotá-lo de uma proteção contra chuva, poeira e insetos. O condicionamento do sensor teve seu uso testado em campo, observando-se eventuais avarias provocadas pelas intempéries, ações danosas provocadas por insetos e pequenos animais como lagartos e roedores. A calibração e ajuste da leitura dos dados monitorados do sensor foram realizadas por comparação com saída de dados do sensor de umidade relativa do ar e temperatura HMP 45C, havendo boa correlação.

Figura 8 – Componente eletrônico do sensor de umidade relativa do ar e temperatura



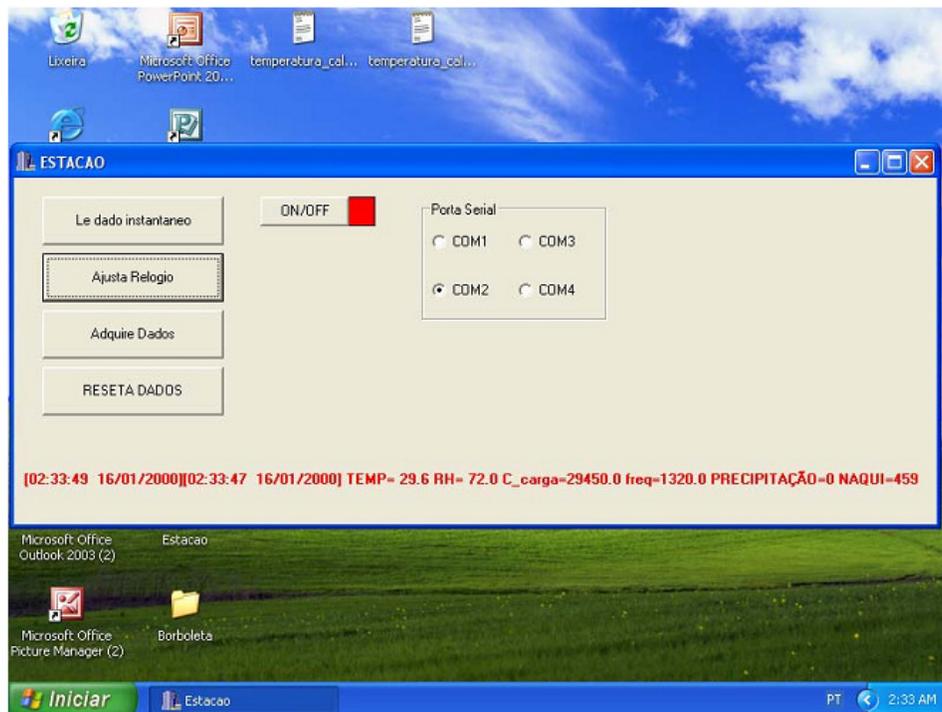
Fonte: Sensirion, 2003.

O SAD obtém o monitoramento da temperatura do solo, por intermédio do circuito integrado LM 35. A função desse circuito integrado é medir a temperatura, dessa maneira, foi feito um condicionamento do sensor para o monitoramento dessa variável. Esse sensor será objeto de uma discussão mais detalhada em capítulo à parte. Em seguida será mostrada a interface gráfica onde o usuário poderá observar os dados em tempo real do sistema de aquisição de dados.

1.8. Interface gráfica de coleta e armazenamento de dados

Além do *firmware* utilizado no microcontrolador, foi desenvolvida uma interface para Windows (criada em C++ IDE Borland) a ser utilizada por operadores treinados no processo de instalação (parametrização da estação), manutenção e coleta de dados locais, através de conexão serial da estação com um PC. Na Figura 9, descrevem-se alguns itens necessários a esta interface, tais como: a escolha de uma porta de comunicação serial adequada através da seleção de um componente (botão on/off) da janela, a exibição das grandezas monitoradas pelos sensores em tempo real e espaços para entradas dos parâmetros de atualização dos dados .O ajuste do relógio permitirá o sincronismo do relógio da estação com o relógio do PC utilizado nos momentos de avaliação e testes e também com as demais estações nos momentos de envio de dados e recepção de comandos de ajuste e testes remotos. A aquisição dos dados armazenados, no banco de memória, poderá ser feita através da interface por um botão *adquire dados* e outro componente da mesma área de comando, o botão *reseta dados*, limpará o banco de memória.

Figura 9 – Interface de comunicação entre PC e estação automática



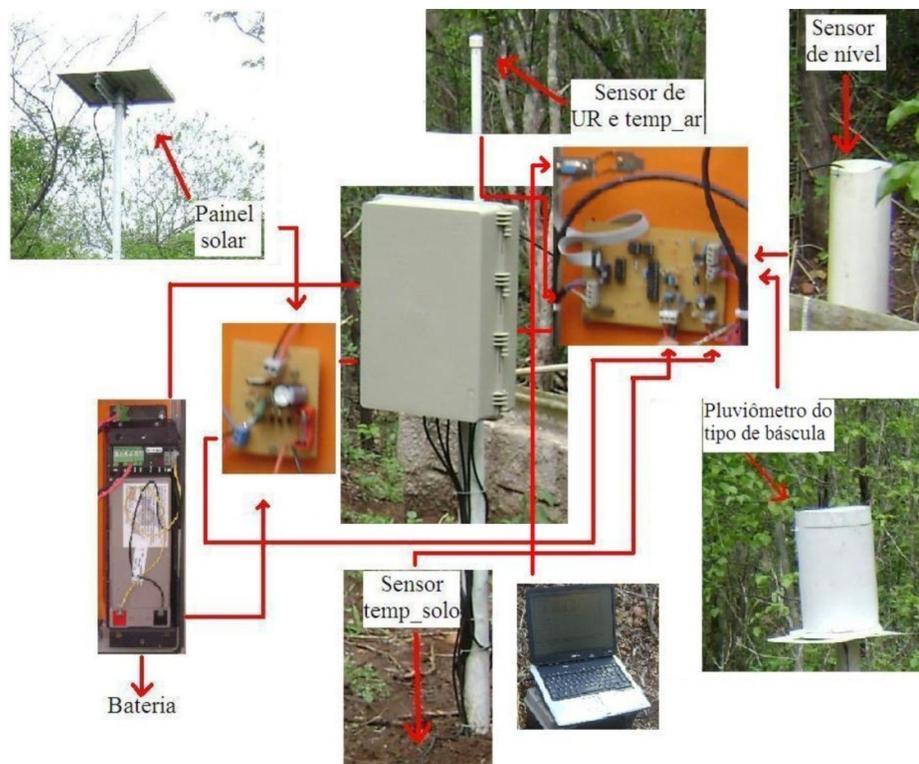
Fonte: Autor.

Após o desenvolvimento dos sensores e da plataforma de coleta de dados, passou-se à etapa de calibração. Nessa etapa, as técnicas desenvolvidas serviram para a calibração da plataforma desenvolvida bem como para calibração de estações automáticas já instaladas no Estado do Ceará.

1.9. Testes Realizados em Campo

Nos testes da estação foram utilizadas as microbacias experimentais, denominadas B1, B2, B3 e B4, inseridas na região semiárida do nordeste do Brasil que faz parte da bacia do Alto-Jaguaribe, no município de Iguatu-CE, entre as coordenadas geográficas 6°23'38'' a 6°23'58'' S e 39°15'21'' a 39°15'38'' W em território do IFCE Campus Iguatu. Os cursos hídricos na microbacia pertencem, segundo a classificação de Sthalher, a cursos de 1ª e 2ª ordem, sendo desta forma, áreas de nascentes de riachos efêmeros. Com o propósito de avaliar os cursos das microbacias foram instaladas estações hidrológicas automáticas com sensor de umidade relativa e temperatura do ar, sensor de temperatura do solo, pluviômetro do tipo de balança, calha Parshall com sensor de nível da coluna de água, sensor de umidade do solo, bateria e painel solar como mostra a Figura 10.

Figura 10 – Componentes da estação automática



Fonte: Alves, 2008.

1.10. Contribuição científica da proposta

O desenvolvimento de uma estaco agrohidrometeorológica, com a aplicação de tecnologia local, cria uma ferramenta capaz de dar suporte a uma série de atividades de pesquisa em diversas áreas de estudo nos cursos de graduação e ps-graduação das instituições de ensino/ou pesquisa do semiárido. A Universidade Federal do Ceará por sua vez, contribui tecnologicamente para o desenvolvimento de um produto que servirá de instrumento para as demais instituições de ensino superior, escolas técnicas e agro-técnicas que em sua grade acadmica, buscam, apesar do alto custo na pesquisa, dar prosseguimento às suas atividades científicas nos ramos das ciências ambientais. O Departamento de Engenharia Agrícola CCA/UFC tem investido, através da equipe que constitui o LEMA, na área da instrumentação aplicada à agricultura de precisão e ao monitoramento ambiental das reservas hídricas da região. O monitoramento da dinâmica das bacias hidrográficas até o acompanhamento da irrigação dentro de áreas cultivadas têm sido os grandes objetivos dos projetos desenvolvidos por esta equipe. A estaco proposta neste projeto dará prosseguimento aos trabalhos em andamento, integrando-se a uma rede de sensores que deverá se distribuir dentro de perímetros irrigados e áreas de potencial produtivo, fornecendo uma consistente base de dados que

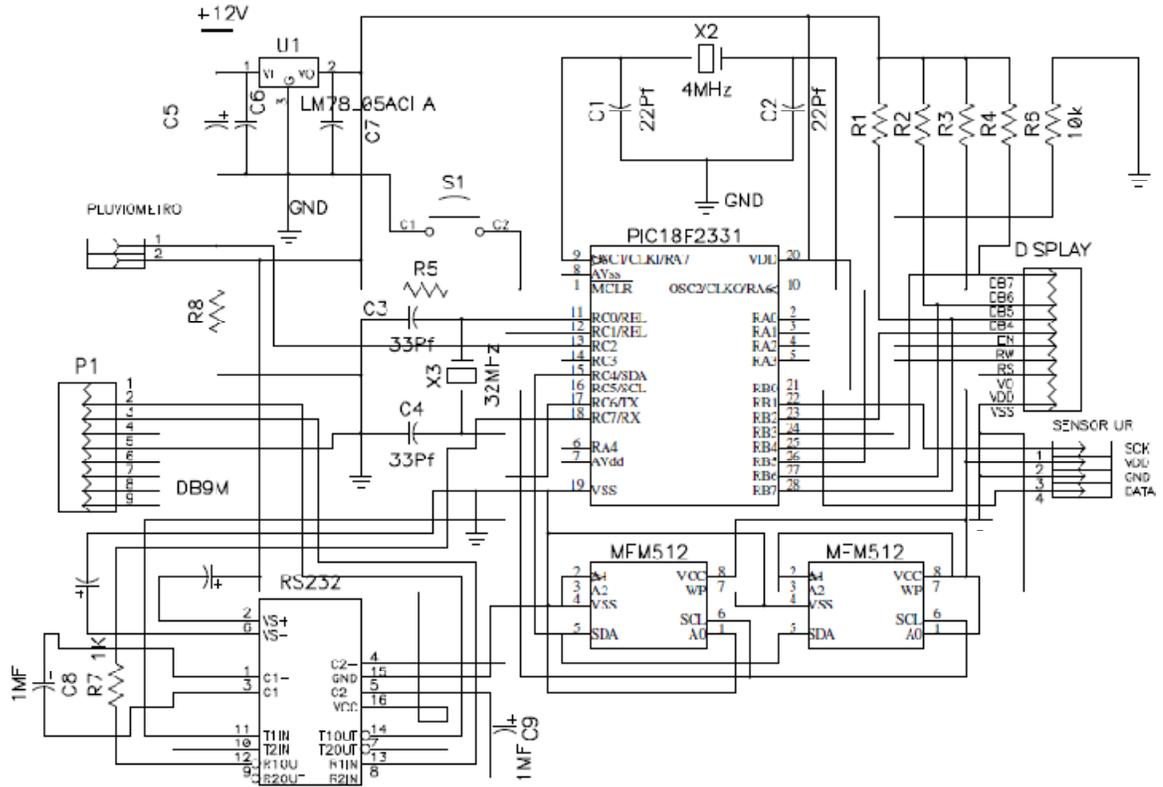
orientará os produtores no uso dos escassos recursos de água e energia. Além disso, o desenvolvimento das metodologias de calibração dos sensores vai contribuir para atender à carência metodológica e instrumental existente no semiárido.

1.11. Resultados

1.11.1. Desenvolvimento e instalação de estação automática de coleta de dados ambientais com microcontrolador.

A Figura 11 ilustra o diagrama eletrônico do protótipo inicial da placa de circuito impresso que é composto basicamente de um microcontrolador (PIC 18F2331), um relógio de tempo real (RTC) baseado no cristal oscilador de 32 kHz, banco de memória externa EEPROM, comunicação com o computador (PC) por intermédio da RS232 (MAX232) e display gráfico de cristal líquido. Os quatros protótipos instalados nas microbacias em 2009, obtiveram dados consistentes das variáveis ambientais monitoradas, no entanto, a proposta do sistema não se resume à coleta e ao armazenamento de dados meteorológicos e hidrológicos.

Figura 11 - Diagrama esquemático multifilar do circuito eletrônico proposto para a estação



Fonte: Autor

A utilização do instrumento pelo usuário, a conectividade e a robustez do instrumento ao uso e ao meio ambiente foram avaliadas. Caso haja necessidade, reprojeta-se e aperfeiçoa-se o sistema. Por conta disso, a placa de circuito impresso foi reprojeta duas vezes. Atualmente a placa tem tecnologia de furos metalizados para melhorar a robustez, pois se verificam alguns problemas de solda fria nos conectores de entrada e saída do sistema. Essa PCI pode ser visualizada na Figura 67 no Apêndice 2.

1.11.2. Conectividade

A conectividade do sistema ocorre por intermédio do protocolo RS232, por intermédio do conector DB9. Nesse caso, os usuários devem ser familiarizados com o sistema de comunicação e ter acompanhamento técnico específico. Os dados são coletados normalmente, no entanto, ainda registrou-se perda de dados, e de eventos por conta de falha na operação ou até mesmo por mau contato nas conexões. Faz-se mister aperfeiçoar a conectividade do sistema, disponibilizando mais vias de conectividade nos protótipos para aumentar a confiabilidade de funcionamento do SAD.

A conectividade dos sistemas embarcados passa pela utilização de comunicação *wireless* por rádio frequência, porta USB, controlador *ethernet*, controlador de área em rede (CAN). Os dispositivos e algoritmos utilizados na conectividade buscam otimizar o monitoramento para permitir a detecção de falhas dos sistemas e observação das variáveis em tempo real.

1.11.3. Desempenho do SAD no campo experimental

A Tabela 1 apresenta os dados obtidos pelo monitoramento de um SAD instalado na microbacia experimental (Iguatu-CE). O SAD foi programado com um intervalo de tempo de armazenamento dos dados de 5 minutos, pois esse é um espaço de tempo em que as variáveis de interesse para o estudo da microbacia podem mudar significativamente. O SAD informa a hora, minuto e segundo em que foi feita a transferência na primeira coluna da tabela, a data da coleta de dados na segunda coluna da tabela e o tempo de cada aquisição na terceira coluna. A quarta coluna mostra o valor da temperatura do ar, em seguida é a medição de umidade relativa do ar. Esse exemplo de demonstração dos dados obtidos foi coletado quando o sensor de temperatura do solo estava desligado, por conseguinte na coluna 8 apresenta um valor de temperatura do solo, que é inconsistente. A coluna 9 é um valor de frequência, inversamente proporcional a vazão do curso de água monitorado. Os eventos de precipitação pluvial têm grande incerteza na dimensão temporal, desse modo o valor na coluna 10, geralmente é zero. E finalmente a coluna 11 apresenta o número de aquisições do sistema, que nesse caso ainda não estava funcionando a contento.

Tabela 1 – Formato dos dados armazenados em banco de memória do SAD.

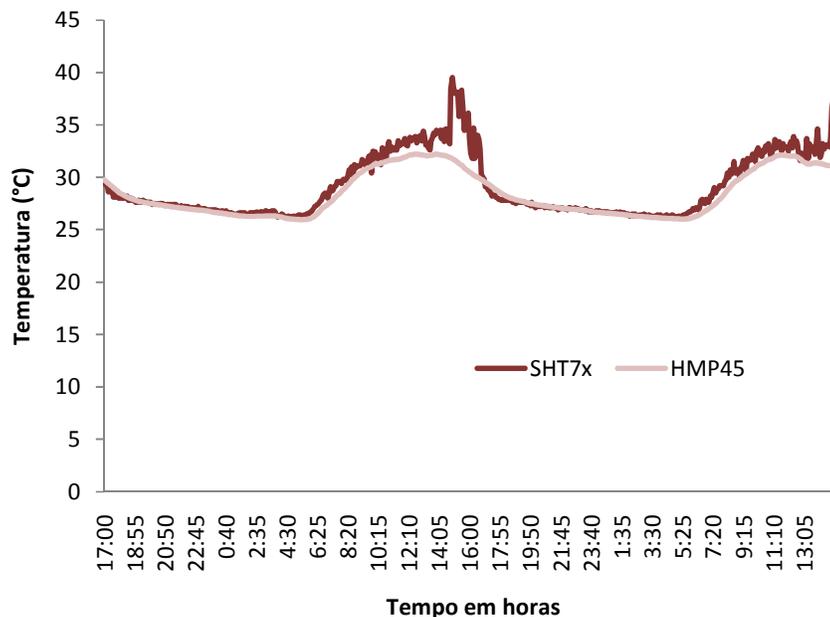
 NAQUI=2305

[16:17:05 05/03/2008][16:13:50 26/02/2008] TEMP= 33.1 RH= 54.2 temp_solo= 8.0 freq=4150.0 PRECIPITAÇÃO=0 NAQUI=7306
 [16:17:05 05/03/2008][16:18:50 26/02/2008] TEMP= 33.1 RH= 54.7 temp_solo= 8.0 freq=4151.0 PRECIPITAÇÃO=0 NAQUI=7287
 [16:17:05 05/03/2008][16:23:50 26/02/2008] TEMP= 32.9 RH= 55.0 temp_solo= 8.0 freq=4155.0 PRECIPITAÇÃO=0 NAQUI=7264
 [16:17:05 05/03/2008][16:28:50 26/02/2008] TEMP= 32.6 RH= 56.2 temp_solo= 8.0 freq=4155.0 PRECIPITAÇÃO=0 NAQUI=7245
 [16:17:05 05/03/2008][16:33:50 26/02/2008] TEMP= 32.5 RH= 56.7 temp_solo= 8.0 freq=4157.0 PRECIPITAÇÃO=0 NAQUI=7224
 [16:17:05 05/03/2008][16:38:50 26/02/2008] TEMP= 32.2 RH= 56.9 temp_solo= 8.0 freq=4158.0 PRECIPITAÇÃO=0 NAQUI=7210
 [16:17:05 05/03/2008][16:43:50 26/02/2008] TEMP= 32.1 RH= 57.2 temp_solo= 8.0 freq=4158.0 PRECIPITAÇÃO=0 NAQUI=7198
 [16:17:05 05/03/2008][16:48:50 26/02/2008] TEMP= 32.0 RH= 57.6 temp_solo= 8.0 freq=4159.0 PRECIPITAÇÃO=0 NAQUI=7194
 [16:17:05 05/03/2008][16:53:50 26/02/2008] TEMP= 31.9 RH= 57.8 temp_solo= 8.0 freq=4160.0 PRECIPITAÇÃO=0 NAQUI=7172
 [16:17:05 05/03/2008][16:58:50 26/02/2008] TEMP= 31.7 RH= 58.7 temp_solo= 8.0 freq=4162.0 PRECIPITAÇÃO=0 NAQUI=7133

Fonte: Autor

Na Figura 12, observa-se o resultado em gráfico da variação da temperatura do ar obtida pelo sensor de temperatura do ar (SHT7x). O gráfico foi obtido a partir de tabela similar à apresentada anteriormente. Uma planilha eletrônica comum foi usada para gerar o gráfico por intermédio dos dados coletados e armazenados no banco de memória do SAD. É feita uma intercomparação com a temperatura medida pelo sensor de temperatura (HMP45) de estação meteorológica comercial.

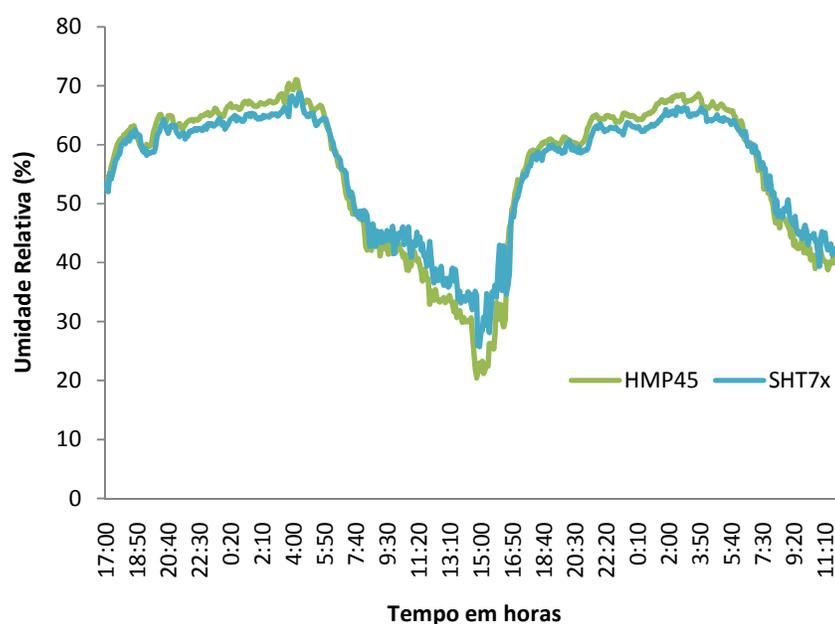
Figura 12 – Variação da temperatura do ar para o dia 21/11/2012 - coletado do SAD.



Fonte: Autor

O mesmo sensor que faz o monitoramento da temperatura do ar, também monitora a umidade relativa. O custo deste sensor é em torno de R\$ 130,00, um sensor de Umidade relativa do ar, usado comumente (HMP45) em estações meteorológicas em todo Brasil, que tem o seu preço definido pela cotação do dólar, custa aproximadamente R\$ 4.000,00. A Figura 13 apresenta o gráfico gerado por dados de umidade relativa do ar, monitorados pelo SAD, desenvolvido no presente trabalho. Há uma boa convergência com o sensor de umidade relativa do ar comercial (HMP45).

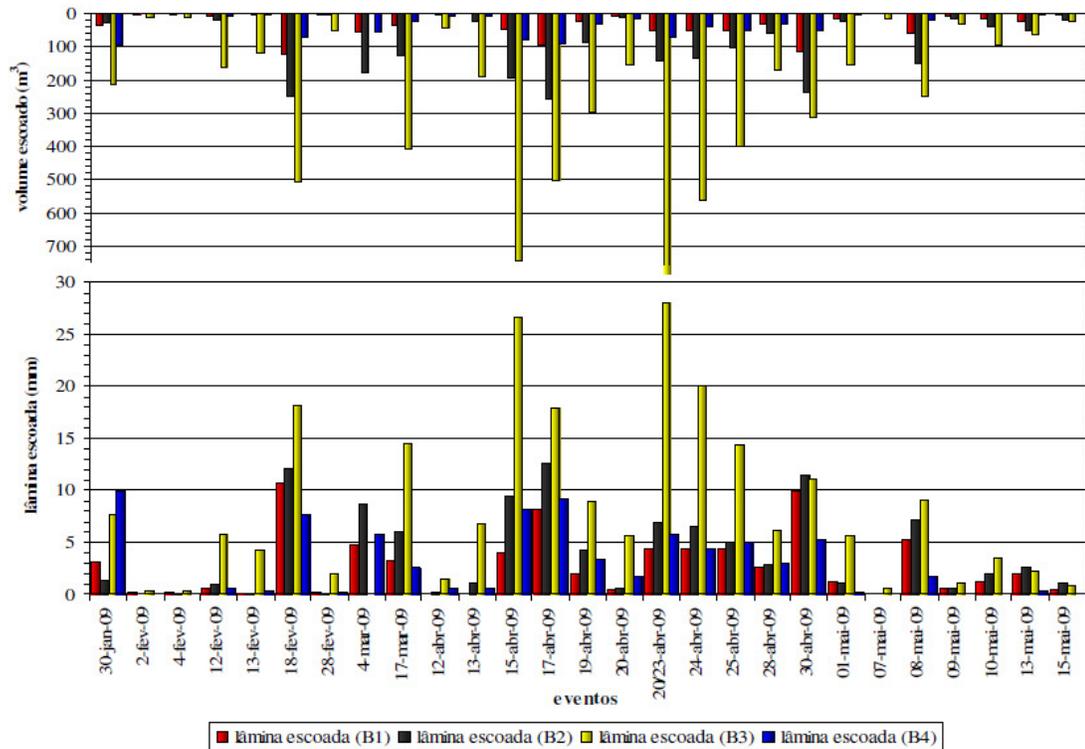
Figura 13 – Variação da umidade relativa do ar para o dia 21/11/2012– e coletado pelo SAD



Fonte: Autor.

O monitoramento do escoamento superficial nos cursos de água das microbacias experimentais é um dos principais objetivos do presente trabalho, assim a Figura 14 ilustra o comparativo hidrológico construído com dados registrados pelo SAD desenvolvido. O hidrograma apresenta o registro de escoamento para o período principal da estação chuvosa de 2009. Os dados de frequência registrados no sistema permitiram a apresentação dos eventos de escoamento com duas grandezas: o volume escoado em m^3 e a lâmina escoada em mm, esses dados medidos podem ser considerados únicos no semiárido nordestino.

Figura 14 – Comparativo hidrológico sobre os parâmetros: lâmina escoada e volume escoado para as microbacias B1 e B2, para a estação chuvosa de 2009.



Fonte: Rodrigues, 2009;

O SAD também monitora os dados dos sensores de índices pluviométricos e temperatura do solo. Os resultados obtidos com esses sensores serão tratados em outros capítulos do trabalho. O SAD possibilitou o desenvolvimento de pesquisa como o monitoramento de outras variáveis ambientais (umidade do solo, massa de solo, condutividade hidráulica), até mesmo de interesse da fruticultura irrigada, vertente mais importante da agricultura irrigada do semiárido do Nordeste do Brasil.

1.11.4. Outros usos do SAD desenvolvido

1.11.4.1. Monitoramento de umidade do solo em microbacia

No que concerne ao estudo das microbacias do semiárido do Nordeste do Brasil, a umidade do solo é uma variável de grande importância no estudo do ciclo hidrológico dessa região, pois serve de parâmetro em modelos que estimam várias características da dinâmica da água após um evento. Assim para medir a umidade do solo nas microbacias, utilizadas como base experimental, foram instalados quatro SADs específicos para monitorar e armazenar dados de umidade do solo com sensor capacitivo de umidade para meios porosos. Foi necessário reconfigurar no programa do SAD a entrada para leitura da frequência e também, a reconfiguração na interface gráfica de programação para o monitoramento da umidade do solo.

O sensor de umidade do solo capacitivo em meios porosos foi desenvolvido no LEMA. Conforme Silva et al. (2005), foram utilizadas duas placas planas de cobre isoladas, configurando um capacitor de placas planas. Essa sonda capacitiva é ligada a um oscilador RC. O oscilador RC e circuitos integrados de divisão de frequência para condicionamento do sinal estabelecem a base de projeto do sensor de umidade de solo capacitivo em meios porosos. O sensor gera uma frequência que tem variação quantitativa dependente da variação da umidade do solo.

Os SAD's para medição específica de umidade do solo instalados nas microbacias experimentais, permitiram a obtenção de dados para calibração e validação de modelos. A estimativa de escoamento superficial em bacias hidrográficas é de suma importância para conservação dos recursos naturais; entretanto, esse é um processo complexo e dinâmico, principalmente no contexto de sua variabilidade espacial. O método do Serviço de Conservação dos Recursos Naturais do Ministério de Agricultura dos Estados Unidos (NRCS-USDA), denominado método do número da curva, que utiliza a precipitação total diária (PPT), incorpora o efeito relativo das características de infiltração de água no solo, uso da terra e práticas agrícolas. O modelo Número de Curva Modificado (CN-MMS) pode ser utilizado quando a umidade do solo (θ_0), anterior ao evento é conhecida. A Tabela 2 ilustra dados de umidade inicial para alimentação de modelos. Esse tipo de dado é de difícil obtenção no semiárido, devido à incerteza temporal de eventos de precipitação atmosférica e a dificuldade de aquisição instrumental.

Tabela 2 – Dados de entrada para calibração e validação de modelo básico de estudo de escoamento superficial.

Data do evento	EV	Dados modelagem/calibração			Dados validação		
		PPT (mm)	volume escoado (m ³)	Umidade inicial (%)	PPT	Volume escoado (m ³)	Umidade inicial (%)
10_04_2010	1	42.42	0.395833333	0.4104	10.71	0.099826	0.334
11_04_2010	2	14.22	0.436631944	0.3414	13.71	0.4375	0.348
19_04_2010	3	45.97	4.884548611	0.2819	24.89	4.313368	0.341
28_05_2010	4	27.18	1.129340278	0.1402	12.91	1.208333	0.3312

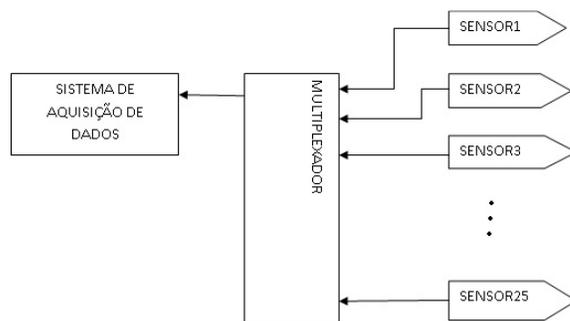
EV – número do evento; PPT - precipitação

Fonte: Autor

1.11.4.2. Avaliação de bulbo úmido em irrigação por gotejamento

A Figura 15 ilustra o arranjo experimental para a medição da umidade do solo com 25 sensores de umidade capacitivos em meios porosos. A via de conexão para o sensor de umidade do solo do SAD só pode receber o sinal de um sensor. O uso de um multiplexador foi a solução encontrada para viabilizar o monitoramento de vários sensores. Segundo Rocha Neto et al. (2009), o monitoramento da umidade do solo com sensores capacitivos para a determinação do bulbo úmido se mostrou eficiente, pois permitiu monitorar essa importante variável com elevada precisão.

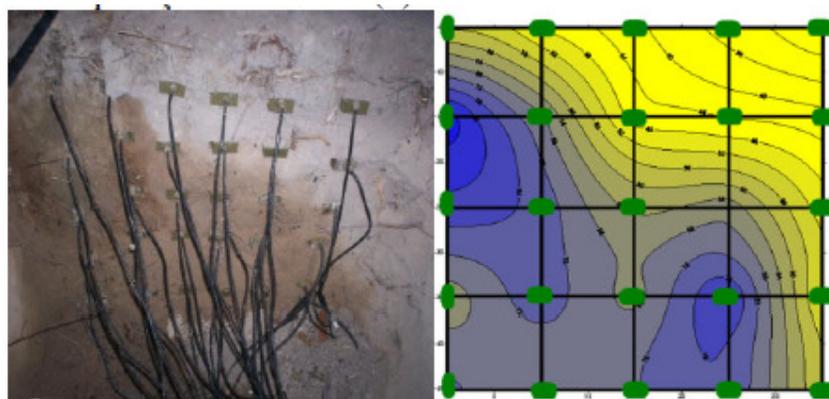
Figura 15 - Diagrama de blocos da grade de sensores para avaliação de bulbo úmido



Fonte: Autor

Após a instalação, o equipamento ficou coletando dados por uma semana, sendo que após esse período os dados foram coletados por computador. Com os valores de frequência obtidos, foram dispostos os dados em uma planilha no Microsoft Excel. Após a análise dos dados, foram dispostos em formas de mapa de umidade através do programa Golden Software Surfer. Na Figura 16, mostra-se uma comparação da grade dos sensores em campo, com o mapa gerado pelo software.

Figura 16 – Comparação entre o bulbo real e o gerado pelo programa *Golden Software Surfer*

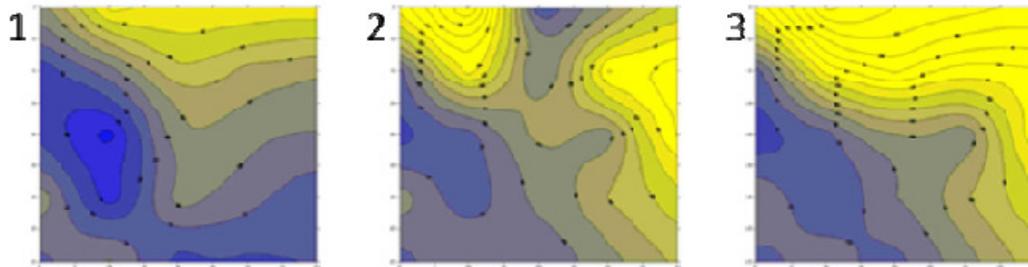


Fonte: Rocha neto, 2009.

Foi selecionado para as análises, o período de 6 horas e meia, que corresponde ao período após a primeira irrigação do dia, 9 horas da manhã e o acompanhamento da segunda irrigação, às 14 horas. Para facilitar a visualização foram selecionados mapas com utilização de uma escala de cor variando do amarelo, que representa a fração do solo mais seco, para o azul, que representa a fração mais úmida do solo. Nas Figuras 17, 18 e 19, constata-se que, após o período de irrigação, há um secamento superior na região mais superficial, numa profundidade de até 0,15 m, e tendo um maior acúmulo de umidade na região de subsuperfície situado abaixo do emissor. No início da irrigação, pode-se perceber que a região onde ocorre maior número de alterações é de 0,2 a 0,4 m de profundidade e de 0,02 a 0,15 m de distância do emissor, mostrando ser a área mais característica para o bulbo úmido do emissor analisado. Os mapas de umidade, após a segunda irrigação, mostraram um comportamento semelhante ao término da primeira irrigação, demonstrando assim a influência da textura do solo, por ser de uma textura franco-arenosa, não tem um grande potencial de reter umidade, em

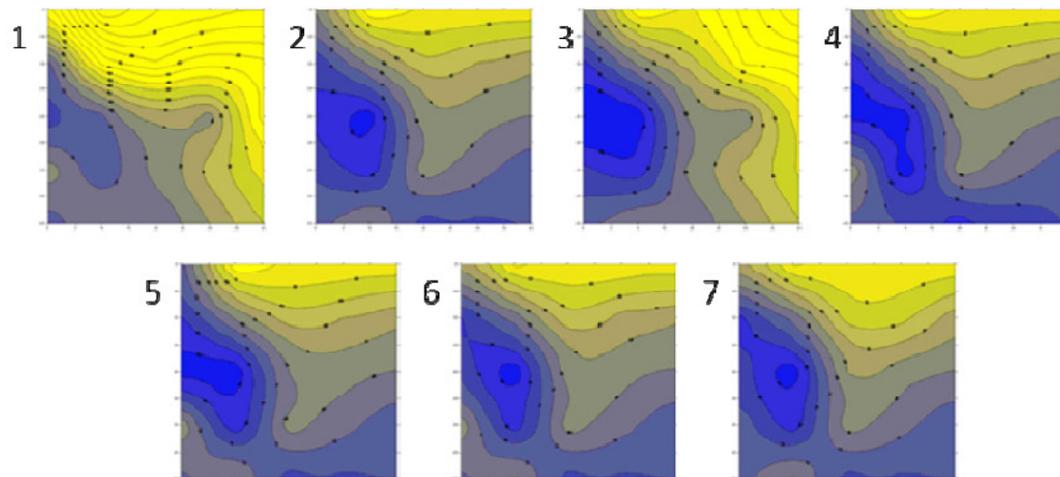
sua porosidade superficial, no entanto, após essa primeira camada, a capacidade de armazenamento de água aumenta (ROCHA NETO et al., 2009)

Figura 17 – Mapa de umidade do solo depois da primeira irrigação nos tempos de: trinta minutos (1), três horas (2) e cinco horas (3).



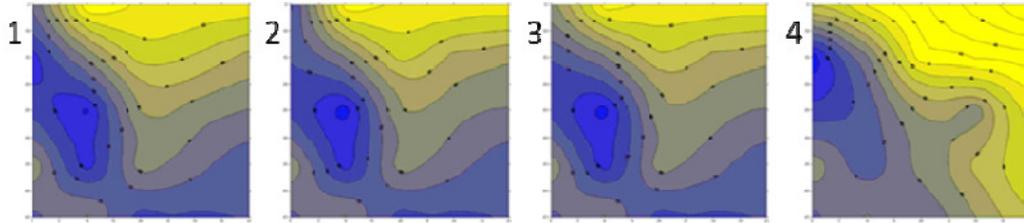
Fonte: Rocha neto, 2009.

Figura 18 – Mapas de umidade do solo durante a segunda irrigação nos tempos de: dois minutos (1), cinco minutos (2), dez minutos (3), quinze minutos (4), vinte minutos (5), vinte e cinco minutos (6) e trinta minutos (7).



Autor: Rocha neto, 2009.

Figura 19 – Mapas de umidade do solo após a segunda irrigação nos tempos de: cinco minutos (1), dez minutos (2), quinze minutos (3) e uma hora (4).

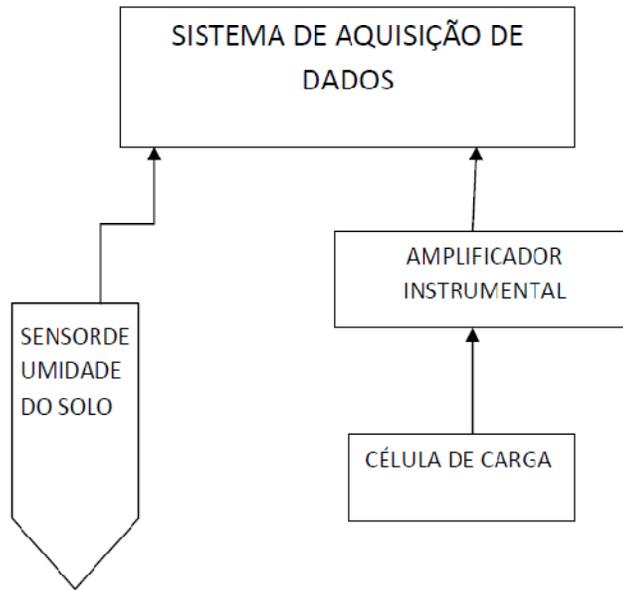


Fonte: Rocha neto, 2009.

1.11.4.3. Calibração de sensores no laboratório

Utilizando o SAD desenvolvido no LEMA, foram testadas configurações para a calibração de sensores. Como exemplo de desenvolvimento, foi utilizado o diagrama de blocos mostrado na Figura 20. Nessa configuração, pode-se calibrar o sensor de umidade capacitivo em meios porosos. A célula de carga gera um sinal em milivoltes, com amplitude máxima de 10 mV, assim foi necessário projetar um amplificador instrumental para compatibilizar a tensão elétrica com a via de entrada analógica do SAD. A célula de carga é utilizada para medição da massa do solo com água. Essa medição de massa determina a umidade do solo que é comparada com o valor da frequência gerada pelo sensor. Dessa comparação, foi obtida a calibração do sensor, que é a correlação da frequência de saída do sensor com a umidade do solo.

Figura 20 - Diagrama de blocos do arranjo para calibração de sensores de umidade pelo método gravimétrico.



Fonte: Autor

Em decorrência do SAD desenvolvido nesse trabalho, outras aplicações de aquisição de dados com confiabilidade foram implementadas e testadas em campo: como a determinação da condutividade hidráulica do solo e o monitoramento de vazão de canais por molinetes. A disponibilidade dos equipamentos, custo do instrumento e a possibilidade de tratamento dos dados com planilhas eletrônicas básicas viabilizam uma ferramenta de coleta de dados para pesquisa e desenvolvimento.

1.12. Conclusões

Nos dias atuais, com as diversas arquiteturas de microcontroladores existentes, é possível conceber algoritmos que proporcionem uma utilização dos recursos de entrada analógica, saída analógica, entrada/saída digital, contadores, sincronização e requisitos de *software* e *hardware* para realizar a aquisição de dados com confiabilidade. Com esses dispositivos é possível realizar projetos de custo reduzido, produzindo sistemas embarcados aplicados no monitoramento e controle das variáveis agrometeorológicas com baixo custo.

O desenvolvimento de tecnologia aplicada com microcontroladores para sistemas de aquisição de dados em monitoramento e armazenamento de dados com baixo custo, aumenta a disponibilidade de instrumentos e faz o desenvolvimento e o aperfeiçoamento metodológico de ensaios de laboratório.

2. DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA DO SAD E DE SENSORES

2.1. Introdução

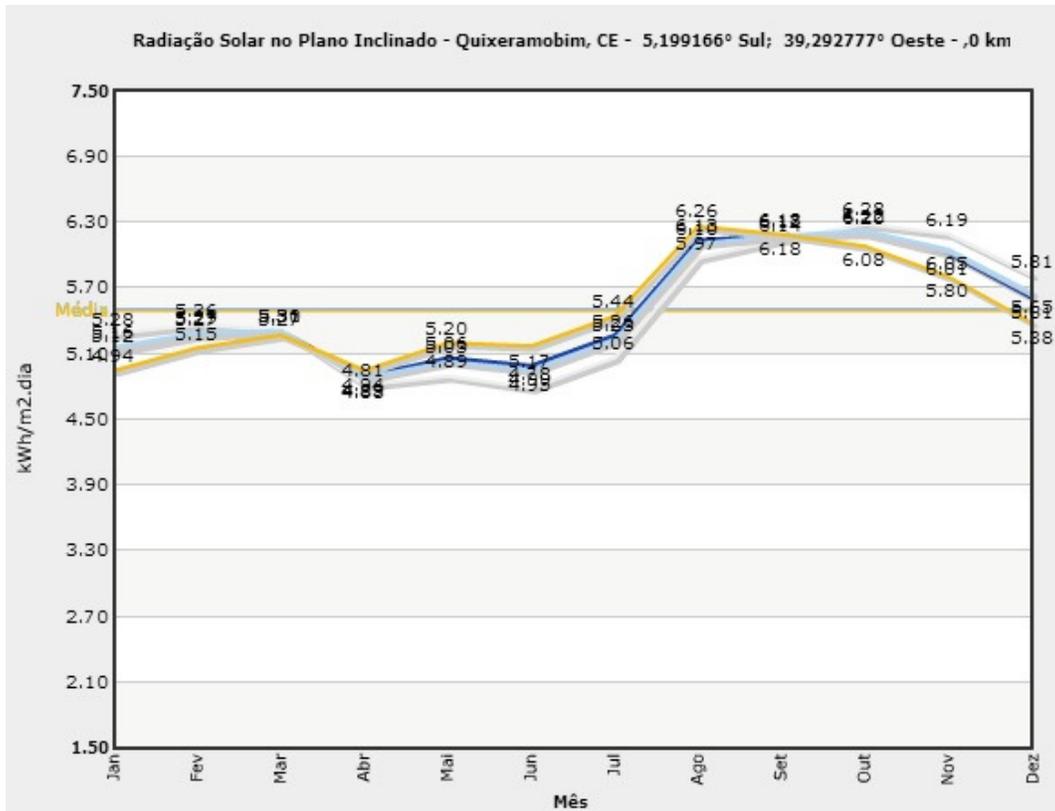
Projetar sistemas de controle e processamento de energia exige a observação da robustez e eficiência do sistema. Em alguns casos a eficiência é premissa, no entanto, em muitos casos o mais importante é a robustez do sistema. Nesse trabalho, três caminhos alternativos foram avaliados: 1) A utilização de um microprocessador de baixo custo e um algoritmo de máxima potência para obter uma melhor eficiência na carga da bateria. 2) Otimização do consumo de energia pelo sistema de aquisição de dados e sensores e dessa forma usar apenas uma bateria durante 6 meses ou até mesmo um ano. 3) Usar o potencial de energia renovável da região com circuitos eletrônicos de fácil acesso no comércio local. A terceira alternativa foi a utilizada na base desse projeto.

Os sistemas agrometeorológicos, a cada dia, necessitam de maior automação do monitoramento, registro e do controle de suas variáveis. Devido à escassez e demanda de recursos naturais, é necessário aumentar a eficiência na sua utilização. O recurso hídrico é um exemplo dessa premissa no semiárido. Se no passado na região semiárida a escassez da água era fator de risco à sustentabilidade, hoje esse risco é maior devido ao aumento na demanda para a irrigação e dessedentação. O monitoramento e o controle preciso do recurso hídrico e das variáveis que influenciam qualitativamente e quantitativamente este recurso são essenciais para a manutenção da sustentabilidade humana no semiárido nordestino.

No monitoramento ambiental, a topologia de sistema embarcado está presente no componente chave deste sistema. O componente principal do monitoramento ambiental é o Sistema de Aquisição de dados (SAD). Este sistema registra em banco de memória de semicondutores os dados monitorados pelos sensores. Como é necessário prover o sistema com energia elétrica em sistemas embarcados e sensores sem fio em regiões remotas, é comum a adoção de sistemas de energia solar fotovoltaica. A energia solar está presente em toda a terra, no entanto, algumas regiões são favorecidas com um maior potencial. A incidência de energia solar na região nordeste do Brasil estabelece um alto nível de potencial em relação à outras áreas do planeta. Pode-se observar essa premissa quando observa-se a radiação solar anual em Quixeramobim (CE), conforme

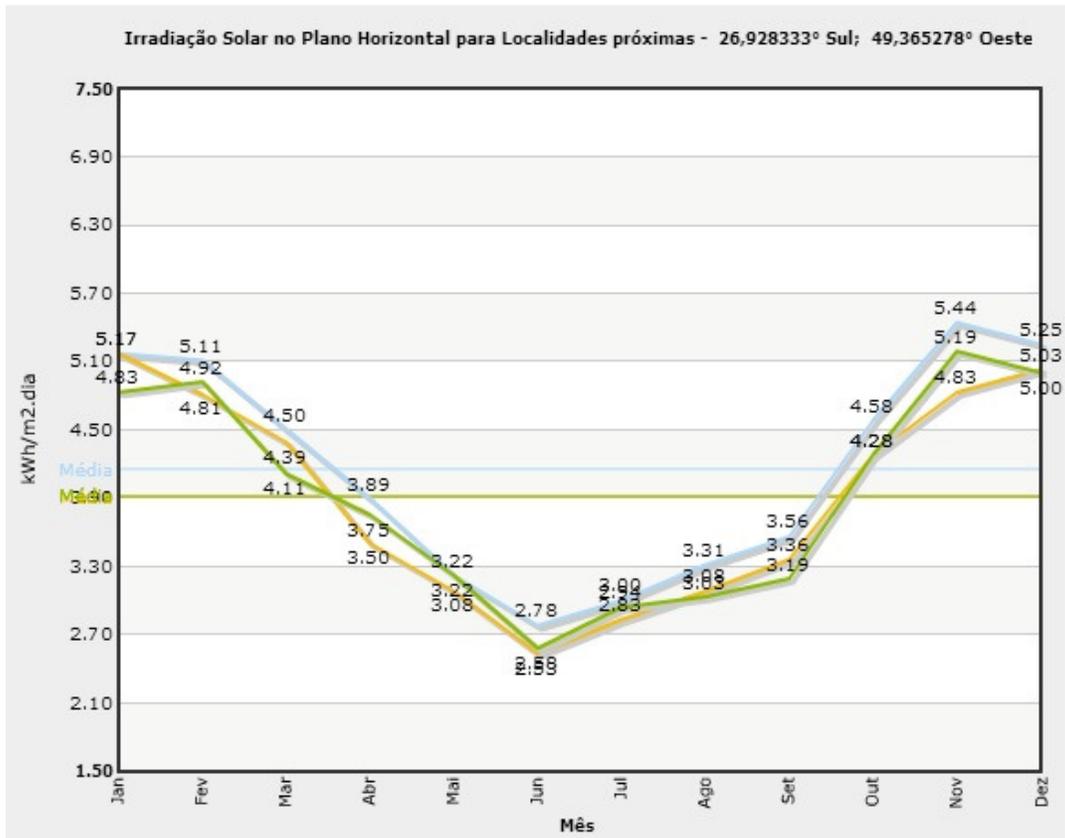
coordenada geográfica na Figura 21 e a radiação solar anual em Florianópolis (SC) na Figura 22. Em Quixeramobim a média anual é de 5,6 kWh/m², 43% acima da média de 3,9 kWh/m² de Santa Catarina. Assim, a disponibilidade do recurso de energia solar foi um fator motivador para um projeto de carregador de bateria com baixo custo.

Figura 21 – Radiação solar anual em Quixeramobim-CE



Fonte: Sun data, Cresesb.

Figura 22 – Radiação solar anual em Florianópolis-SC



Fonte: Sun Data, Cresesb.

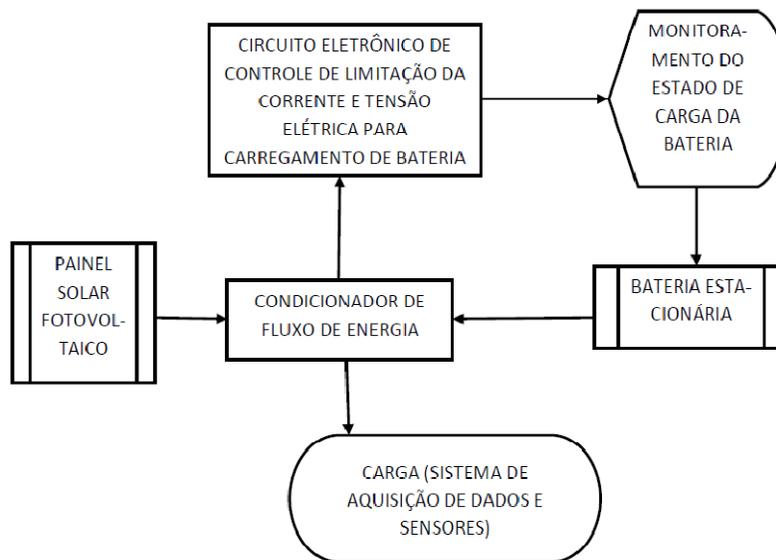
2.2. Metodologia

O objetivo do projeto é implementar um carregador de baterias estacionárias com fonte de energia solar, bem como dotar o sistema como fonte de energia para sensores e sistema de aquisição de dados ambientais. O diagrama da figura 22 apresenta os componentes do sistema e sua interligação. Na região Nordeste do Brasil, o recurso de energia solar tem potencial acima da média global, assim é utilizado um painel solar de 10 Wp para prover energia para o SAD. A placa de monitoramento e armazenamento de dados e todos os sensores são alimentados por um sistema ininterrupto de geração de energia constituído de baterias carregadas por painéis solares. Um painel com células solares multicristalinas podem fornecer uma potência de 10 W a uma bateria de 12 V e 9 Ah.

Um circuito faz o controle de carga da bateria pelo painel solar aumentando a vida útil da bateria. Foi desenvolvida uma fonte de carga de baterias estacionárias (12 V e 9 Ah) utilizando uma configuração de uma fonte de corrente com limitação de tensão elétrica de carga da bateria e diferença de potencial elétrico de entrada gerada por painel solar. Com o circuito projetado, pode-se fazer o carregamento da bateria do sistema aquisitivo de campo e ao mesmo tempo alimentá-lo com energia elétrica. A montagem da placa de circuito se torna um processo simples, pois são utilizados componentes eletrônicos conhecidos e não há preocupação com ruídos.

Um dos problemas da energia solar é a sua indisponibilidade durante o período noturno, assim é necessário adotar um sistema de controle, armazenamento, e monitoramento dessa energia. O sistema de controle de armazenamento de energia faz o controle de corrente e tensão elétrica, pois o controle preciso desses parâmetros permite estabelecer alto desempenho da vida útil da bateria. O sistema de controle está representado pelo maior retângulo da Figura 23. O gerenciamento do fluxo de energia é necessário, pois há momentos em que ocorre o fluxo de energia da fonte (painel solar) para o sistema de carga da bateria e também para o consumidor (sistema de aquisição de dados e sensores). No período noturno, esse fluxo de energia vem apenas da bateria para a carga ou consumidor. O desafio foi projetar esses dispositivos com baixo custo e testar seu desempenho em campo nas condições ambientais características do semiárido.

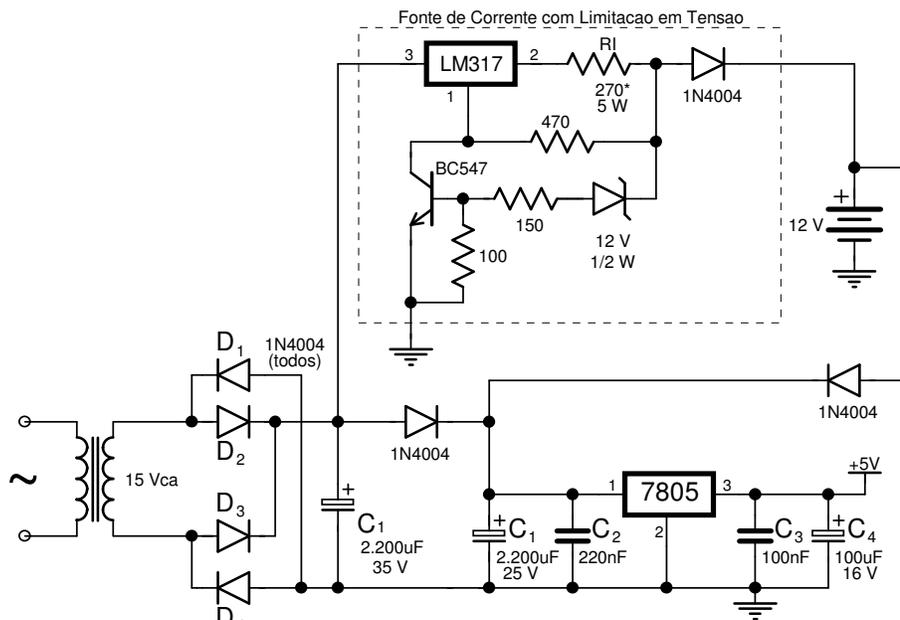
Figura 23 – Diagrama de blocos do sistema de provimento de energia



Fonte: Autor

A engenharia reversa usualmente é uma das técnicas adotadas por empresas que trabalham com inovação. Em geral, esta técnica não gera novos conhecimentos, pois requer pouco nível de aprendizado. Não obstante, muitas habilidades e atividades necessárias à engenharia reversa podem facilmente transformar-se nas atividades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). As atividades e habilidades requeridas por esses processos são, na realidade, as mesmas do processo de inovação da P&D. As habilidades e atividades da Engenharia Reversa podem ser bastante úteis nas adaptações criativas que envolvem processos ou dispositivos de um setor produtivo para outro (KIM & NELSON, 2009). No ambiente industrial, uma fonte de alimentação de Corrente Contínua (CC) aliada ao carregador de bateria cuja característica é apresentada no diagrama abaixo é bastante usual (Figura 24). Na indústria, este circuito eletrônico atende o setor, pois tem robustez, baixo custo e simplicidade, o que permite a produção em escala. O componente principal do diagrama elétrico abaixo é o circuito integrado LM 317. Este componente é um regulador de tensão elétrica contínua, ajustável de 3 pinos. A corrente nominal de saída desse componente eletrônico é de 3,4 A e uma tensão de saída regulada entre 1,2 V e 37 V (FAIRCHILD, 2013).

Figura 24 – Circuito eletrônico para fonte de alimentação de corrente contínua e carga de bateria



* De acordo com a corrente de carga desejada. $I_c = 1,25/R$
 Obs.: Resistores de 1/8 W, salvo quando especificados.

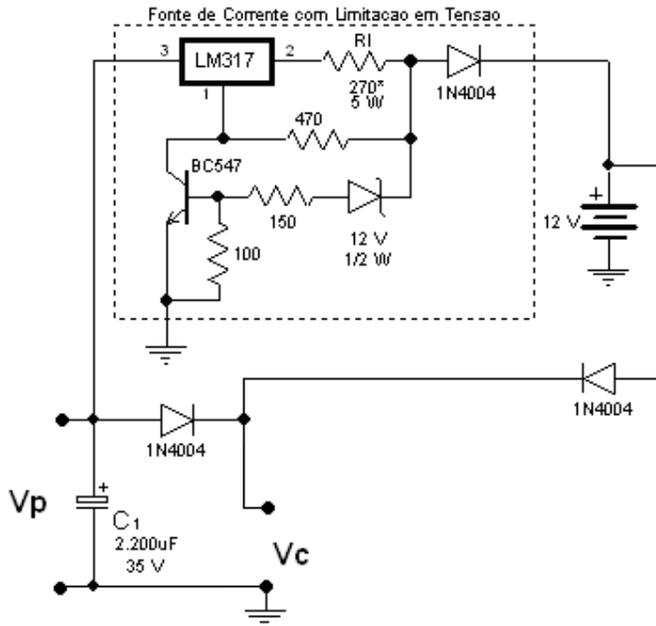
Fonte: Autor

As baterias estacionárias são utilizadas em sistemas de alimentação com *nobreak* por apresentarem maior tempo de vida útil. Para obtenção de um bom desempenho no tempo de vida útil é necessário um adequado gerenciamento no carregamento da bateria. Baterias estacionárias de 12 V e 7,2 Ah tem seu uso generalizado em nobreak, e assim por conta da economia de fabricação em escala, essa bateria tem um custo reduzido. Os parâmetros principais para se fazer o carregamento dessa bateria e obter uma maior vida útil, são:

- Limitar a tensão de carga em 13,8 VCC;
- Limitar a corrente de carga em aproximadamente 10% do valor nominal da corrente da bateria, que nesse caso é de 720 mA.

As características do circuito integrado LM 317 podem fornecer esses parâmetros, desde que este seja usado em um circuito eletrônico com componentes interligados e dimensionados adequadamente. O circuito eletrônico da Figura 24 foi utilizado como base para projetar o carregador dedicado para esse tipo de bateria. A Figura 25 ilustra o diagrama eletrônico inicial do projeto. No circuito eletrônico da Figura 25, os componentes eletrônicos que configuram o circuito integrado LM 317 para controlar a limitação de corrente ideal de carga da bateria do projeto não foram inseridos, pois faz-se necessário um dimensionamento e testes de calibração para uma configuração precisa. Nas conexões Vp vai ser ligado ao painel solar e nos conectores indicados como Vc, é ligado a carga, que pode ser um sistema de aquisição de dados.

Figura 25 – Circuito eletrônico base para configuração de regulador de tensão LM 317

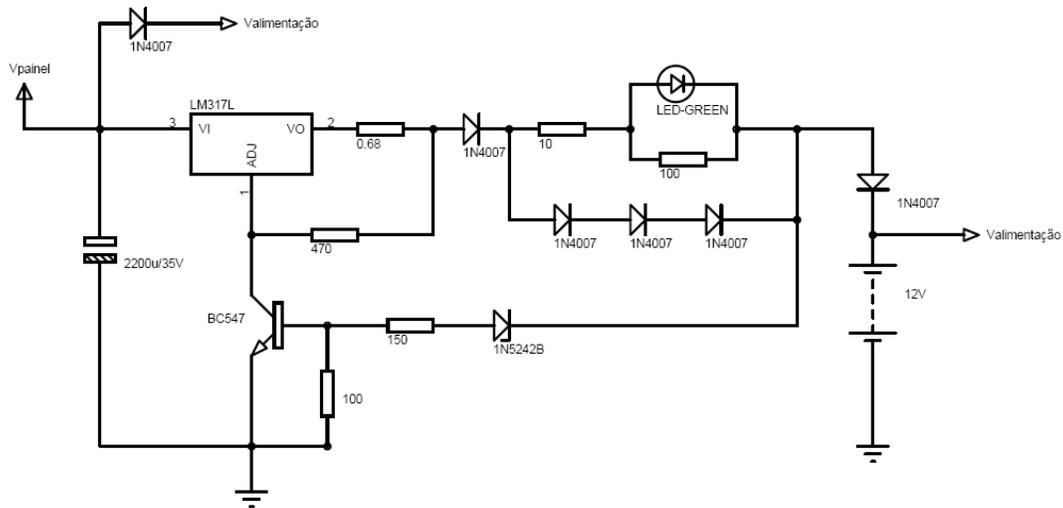


Fonte: Autor

Nos momentos de sol pleno a energia para a carga e para carregar a bateria é obtida do painel solar. Quando não há energia disponível nos terminais do painel solar, a carga recebe alimentação da bateria estacionária.

Com os parâmetros ideais de carga da bateria, foram dimensionados os componentes para serem utilizados no sistema. Também foram realizados ensaios em laboratório, para adequar corretamente os valores de projeto dos componentes eletrônicos, aos encontrados no comércio e verificar a eficiência das inovações adotadas. O diagrama eletrônico, após dimensionamentos de componentes e testes de laboratório é mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Diagrama do circuito eletrônico do carregador de bateria com painel solar.



Fonte: Autor

Com o objetivo de adquirir robustez e confiabilidade para os protótipos, a partir do diagrama da Figura 25, foi projetado uma placa de circuito impresso. Esta placa foi confeccionada em dupla face com furos metalizados para garantir resistência à intempéries, pois protótipos projetados anteriormente apresentaram problemas com oxidação da solda dos componentes eletrônicos decorrente de umidade. O projeto implementado da placa de circuito impresso é apresentado na Figura 67 do Apêndice 2.

2.3. Resultados

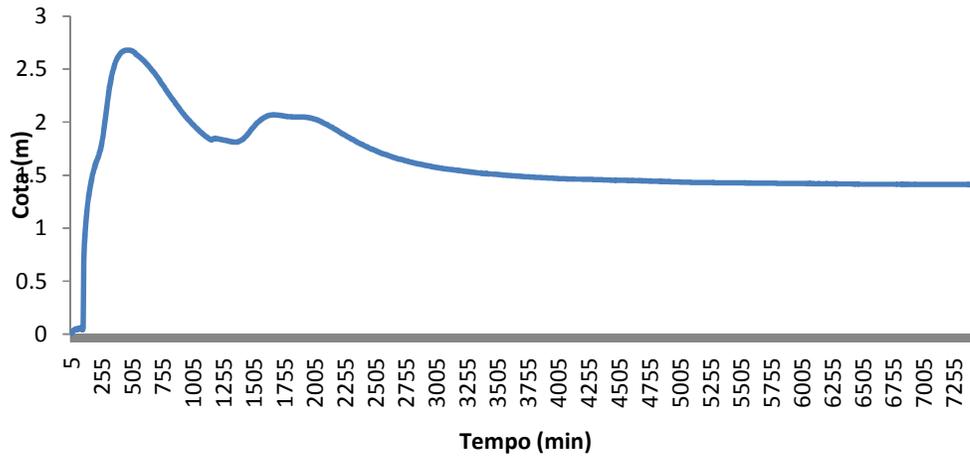
Em 2009, uma versão inicial do gerenciador de energia desenvolvido nesse trabalho foi montado no campo experimental. O sistema de gerenciamento e carga de bateria com painel solar fornecia energia sem interrupções a quatro SAD. Cada SAD recebia sinais elétricos de um sensor de temperatura e umidade relativa do ar, um sensor de umidade do solo, um sensor de vazão e um pluviômetro automático. A energia para os sensores era fornecida pelo gerenciador de energia. O sistema de carga da bateria foi eficiente na recarga da bateria possibilitando a coleta e o armazenamento de dados também no período noturno, no entanto, ocorreram períodos extensos de nebulosidade e três baterias perderam a carga. Uma avaliação do circuito, apontou como causa do problema um superdimensionamento do resistor *shunt* da placa de circuito impresso de carga da bateria. No laboratório, foram feitos ensaios de carga das baterias com o

objetivo de obter um ajuste fino do valor do resistor. Foram encontradas as especificações do resistor *shunt* que obtivesse o máximo desempenho de carga da bateria e que essa especificação fosse disponível comercialmente, o valor especificado, após os testes e que convergiu com o valor encontrado no comércio foi de 0,68 Ohms.

A especificação das baterias estacionárias utilizadas têm que ser observadas com rigor, como foram diversos sistemas instalados para verificar a eficiência dos mesmos, também foi feito o uso de baterias com parâmetros diferentes, essas baterias também tiveram que ser trocadas por outras mais adequadas. O sistema foi dimensionado por sua vez, para uma bateria específica, para atingir a maior eficiência possível. O critério de escolha da bateria é que ela seja estacionária com disponibilidade no comércio local.

O ajuste fino no valor do resistor *shunt*, a utilização de baterias com a especificação correta de todos os parâmetros, utilização de PCI robusta com tecnologia de furos metalizados e disponibilidade visual de monitoramento de carregamento da bateria solucionaram os problemas de carga desse equipamento em períodos longos de nebulosidade, pois além dos quatro SAD's e sensores que estavam instalados na área experimental, três SAD's para o monitoramento de umidade do solo foram montados no campo experimental. O sensor de umidade do solo funciona com aproximadamente 40 mA em 6,3 V, essa especificação demanda uma potência de 0,256 W com um consumo energético na ordem de 6,4 Wh. Em 2013 três SADs de alto desempenho foram instalados na área. Um SAD monitora um sensor disponível no comércio, o segundo monitora o sensor de radiação solar e o sensor de velocidade e direção do vento e o terceiro SAD monitora a radiação solar. Esses SAD's comerciais usam o gerenciador desenvolvido e funcionam sem problemas no fornecimento de energia e nenhum ruído eletromagnético até a presente data (agosto de 2013). A Figura 27 ilustra o funcionamento do sensor de nível do SAD comercial.

Figura 27 – Nível de água obtido com dados monitorados por sensor de nível automático de pressão.



Fonte: Autor

2.4. Conclusão

O uso da energia solar na região semiárida brasileira provê, de forma adequada energia a sistemas embarcados para monitoramento ambiental, bem como os sensores eletrônicos para esse monitoramento. Para alcançar a viabilidade de fornecimento energético é necessário dimensionar sistemas eletrônicos de gerenciamento aplicados de energia. Usando o alto nível do potencial energético solar, aliado ao projeto eletrônico de gerenciamento de energia com componentes eletrônicos disponíveis no mercado local, pode-se chegar a equipamentos robustos (vem funcionando no campo experimental há mais de 2 anos) e de baixo custo.

O gerenciador de energia desenvolvido no trabalho, possui característica de portabilidade, pode gerenciar e prover energia sem interrupções para SAD's e sensores de auto desempenho ambientais disponíveis no mercado.

3. DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE VAZÃO AUTOMÁTICO APLICADO À MICROBACIAS DO SEMIÁRIDO.

3.1. Introdução

Modernas Plataformas de Coleta de Dados (PCD) são compostas de uma unidade central de processamento (UCP), com memórias para armazenamento dos dados coletados e canal de comunicação para envio das informações. As estações são alimentadas por baterias e mantidas carregadas por painéis solares. Os sensores conectados à unidade de processamento são do tipo: pluviômetro (índice pluviométrico), termógrafo (temperaturas), anemógrafo (velocidade do vento), cata-vento (direção do vento), barógrafo (pressão atmosférica), evaporímetro (evaporação de água), higrômetro (umidade relativa do ar) e um sistema transmissor acoplado a uma antena. No contexto atual, além dos sensores básicos que compõem uma PCD, outro sensor assume relevância em decorrência da importância da água como recurso natural. A demanda e as disputas pelo uso da água aumentaram, implicando no aumento da importância da medição de vazão. Com isso, o desenvolvimento de métodos e instrumentos de medição de vazão, aplicados em diferentes situações, tornaram-se necessários para solucionar essas questões (CAMARGO, 2009).

Atualmente, a microbacia hidrográfica é aceita como proposta de unidade para aquisição de dados que norteiem o conhecimento e possibilitem a recuperação, preservação e o manejo adequado do recurso hídrico (ALVES, 2008). O conhecimento preciso da vazão de uma microbacia exige a adoção de sensores de vazão específicos. As condições climáticas, a variação espacial do solo e o manejo diversificado aplicado na microbacia, trazem heterogeneidade às microbacias e dinâmica não lineares das variáveis hidrológicas do semiárido. Assim, um sensor para medir a vazão de uma microbacia do semiárido tem suas peculiaridades. Deve ter alta disponibilidade e ser acessível economicamente, pois a diversidade do sistema necessita de um número alto de postos de medição, além de um longo período de monitoramento.

A proposta do trabalho de desenvolvimento do sensor pode gerar disponibilidade e pequeno custo do dispositivo, dotando de ferramentas alternativas às pesquisas no semiárido do Brasil, dando possibilidade de cognição plena da heterogeneidade dessa região, na qual, a agricultura de precisão se faz presente por intermédio da difusão de pólos agrícolas irrigados, os quais, por sua vez demandam uma parcela significativa dos

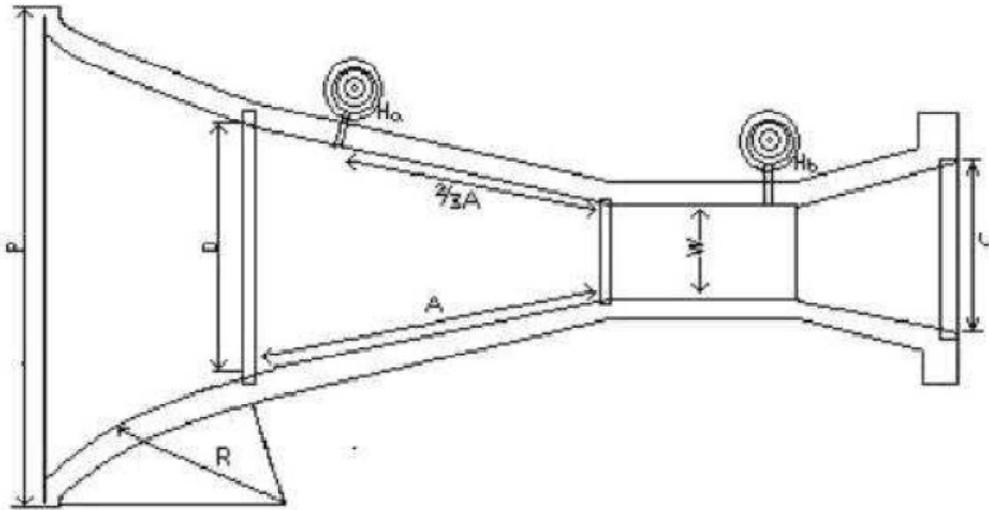
recursos hídricos do semiárido e tem carência de medição automática de vazão em canais abertos de pequeno e médio porte. O monitoramento automático de vazão, nesses canais, permite a economia de água, insumos e energia pelo estabelecimento de um maior controle automático do recurso hídrico, evitando perdas por ineficiência na aplicação desse recurso e vazamentos no sistema de canais. Na visão de Baum et al. (2003), a demanda de água pela agricultura, indústria, uso urbano e atividades recreativas, está aumentando. A demanda crescente exige manejo adequado e conservação dos limitados recursos hídricos. Assim, medidores de vazão adequadamente selecionados para cada situação, permitem mensurações precisas do fluxo de água.

3.2. Metodologia de desenvolvimento do sensor de vazão

Devido à característica dos rios da região, o deflúvio superficial em cursos de água do semiárido pode ser monitorado por sensores de vazão que utilizam calha Parshall e sensores de nível capacitivo de precisão (ALVES, 2008). O escoamento superficial, nos cursos de água das microbacias de interesse, tem como característica principal escoamento com altas vazões durante os eventos pluviais, mas com o final dos eventos, o escoamento cessa. Os componentes principais do sensor de vazão são: uma calha parshall, confeccionada com medidas baseadas pela estimativa do pico de vazão do escoamento superficial do curso de água a ser monitorado e um sensor eletrônico de nível de precisão com saída digital.

As dimensões da calha, (Figura 28) foram calculadas, a partir de um evento com intensidade de 50 mm h^{-1} , estando o solo sem cobertura vegetal (ALVES, 2008). A equação racional foi empregada para o cálculo da vazão máxima (pico de descarga).

Figura 28 – Planta baixa da calha parshall



Fonte: Alves, 2007.

A equação da calha relaciona o pico de descarga (Q) e altura da coluna d'água no tranquilizador (H_m), sendo esta equação dependente da secção de estrangulamento do fluxo (W). Conforme a equação a seguir:

$$Q = 3,072 * W * 0,0086 W^{0,026} * H_m^{1,393 * W^{0,026}} \quad (1)$$

Q = Pico de descarga em (L/s);

W = Largura do estrangulamento do fluxo em cm;

H_m = Altura da coluna d'água no tubo tranquilizador em cm.

Utilizando um medidor de nível no ponto H_a da calha parshall pode-se encontrar a vazão do curso de água. Segundo Rodrigues (2009), por intermédio de dados de vazão correlacionados com um período de tempo, pode-se gerar hidrogramas para cada evento de chuva correspondente. Esses dados são obtidos a partir das elevações de nível de água ou cotas registradas no linígrafo automático da calha Parshall (Figura 29) instalado na bacia de interesse. Esses dados foram coletados continuamente em intervalos de 5 minutos, convertidos posteriormente em vazão mediante equação específica da calha (equação 1).

Figura 29 – Instalação de sensor de vazão (calha Parshall + linígrafo) com nível mínimo (a) e nível máximo (b)



[a]



[b]

Fonte: Rodrigues, 2009.

O conjunto sensor de nível e calha Parshall se integram em um sensor de vazão. Usando o sensor de nível para obter o nível de água (Figura 30) em um ponto específico da calha será possível obter a vazão do córrego. Para medição de vazão de nível de canais e rios, uma alternativa técnica adotada é o uso de sensores ultra-sônicos, no entanto são sensores caros e para grandes vazões. O sensor de nível desenvolvido neste trabalho tem como elemento sensor um capacitor de placas planas. De forma breve será relatado o funcionamento de um capacitor, até o entendimento de um capacitor de placas planas.

Figura 30 – Capacitor de nível de água com placas planas



Fonte: Santos, 2012.

Um capacitor é um sistema de dois condutores, com potenciais diferentes, eletrizados com cargas opostas (PURCELL, 1963). Na visão de Carvalho e Silva (2002), este dispositivo é utilizado para armazenar energia, na forma de energia potencial, contida em campos elétricos. Os capacitores têm várias aplicações, além de servirem como armazenadores de energia. Eles constituem elementos importantes nos circuitos elétricos de transmissores e de receptores de rádio e televisão. Os capacitores microscópicos formam os bancos de memória dos computadores. Tais campos elétricos são significativos também pela informação, liga/desliga que a presença ou ausência deles proporciona. Atualmente, um tipo de capacitor batizado como supercapacitor ou ultracapacitor, desponta como substituto de baterias, inclusive em SAD. A tendência é que as baterias sejam substituídas por esses capacitores em muitas aplicações.

Os condensadores se apresentam numa grande variedade de tamanhos e formas. Entretanto, os elementos básicos de qualquer capacitor são dois condutores isolados de formatos arbitrários. Denominam-se tais condutores de placas, quaisquer que sejam suas geometrias. Quando a geometria das placas condutoras é semelhante a retângulos, os capacitores são batizados de placas paralelas. Existem também os esféricos e os cilíndricos. Segundo Purcell (1963), o capacitor, sistema de dois condutores, isolados um do outro, é caracterizado por certa capacitância C (farad), que é uma constante relacionando o valor da carga Q (coulomb) no capacitor (carga positiva Q numa placa, carga negativa igual na outra) com V_{12} (volts), a diferença de potencial entre os dois condutores:

$$C = Q/V_{12} \quad (2)$$

Para o capacitor de placas planas paralelas, em duas placas delgadas com área A (cm^2) e separadas pela distância t (cm), deduz-se que a capacitância é dada por:

$$C = \frac{A}{4\pi t} \quad (3)$$

A equação acima é válida somente quando o espaço entre as placas do capacitor estiver no vácuo. Para capacitores que tem o espaço entre as placas preenchido com algum tipo de matéria, é necessária a inserção do fator constante ϵ , característico da substância que se encontra entre as placas do capacitor, para dar corretamente a capacidade de qualquer capacitor preenchido com esse material (equação 4)

$$C = \frac{\epsilon A}{4\pi t} \quad (4)$$

O desenvolvimento de um sensor capacitivo, como medidor de nível de água, realizado por Cruz et al. (2007) apresentou-se como um modelo para sensores de nível a pequenas alturas. O sensor de nível desenvolvido nesse trabalho é um sensor capacitivo de placas planas, construído na forma retangular em placas de circuito impresso (fibra de vidro), com espessura, largura e tamanho aproximados de 0,2 cm, 3 cm e 70-90 cm, respectivamente. As placas posicionadas paralelamente definem os eletrodos do capacitor, separadas em 0,5 cm e protegidas de eletrólise por uma camada de verniz, que segundo Rende & Biage (2002), serve, tanto para evitar oxidação das placas de cobre, como para eliminar o efeito da condutância elétrica da carga através do dielétrico.

O princípio de funcionamento do sensor de nível capacitivo é a mudança qualitativa e quantitativa do seu dielétrico, alterando o valor da capacitância do dispositivo, dada pela equação 4. A mudança qualitativa pode ser traduzida quando observa-se o valor da constante ϵ do ar na Tabela 3, e o valor dessa constante para a água. Fica evidente que a capacitância de dois capacitores idênticos, mas um com dielétrico de ar e outro com parte do dielétrico preenchido de água é totalmente divergente por conta da polarizabilidade elétrica dos dois materiais, pois no ar a constante dielétrica é 1,00059 e na água a constante dielétrica é 80. A variação quantitativa do dielétrico é devida à alteração do volume do material no interior das placas do capacitor.

Tabela 3 – Constantes Dielétricas de Várias Substâncias

Substância	Constantes dielétricas
Ar	1,00059
Água	80
Amônia	22
Cloreto de Sódio	6,12
Enxofre	4,0
Polietileno	2,25 – 2,3

Fonte: Purcell, 1970.

O circuito do sensor capacitivo é composto de um oscilador RC, cuja frequência é definida pelo sensor capacitivo de entrada, e por um divisor de frequência. As placas são espaçadas por peças cilíndricas de cobre com altura e diâmetro de 0,5 cm, com um furo central de 0,2 cm de diâmetro, por onde passam os parafusos de aço galvanizado de mesmo diâmetro. Pelas mesmas peças de cobre por onde se faz o espaçamento entre as placas do capacitor é feita a conexão eletrônica entre circuitos integrados que compõem o sensor. Além dos espaçadores das placas do capacitor, onde há a interligação do circuito eletrônico, as placas planas são espaçadas por isoladores ao longo do seu comprimento, para garantir estabilidade entre a distância das placas sondas, pois as placas do capacitor adquirem alguma flexibilidade devido ao comprimento dessas placas serem de 80 cm.

3.3. Investigação da interferência da qualidade da água das microbacias na confiabilidade de medição do sensor

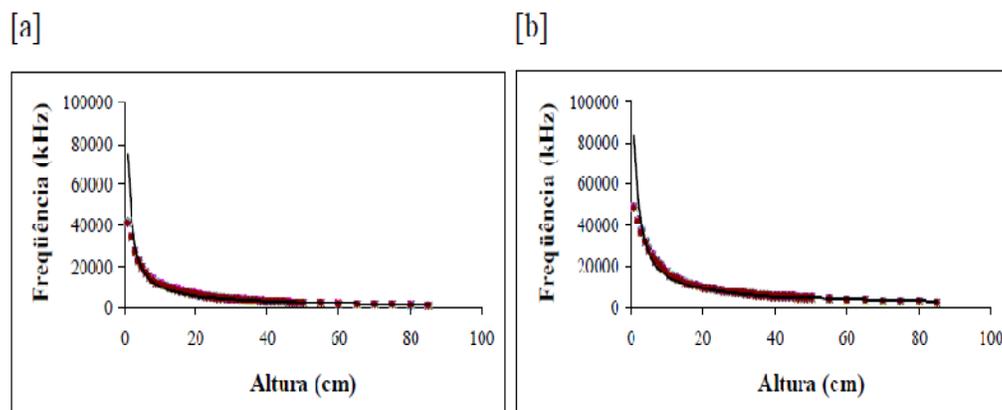
A qualidade da água nas microbacias pode afetar a precisão da leitura dos sensores de vazão sobre vários aspectos. Merece destaque, o efeito que as variações de alguns sais podem representar, especialmente pela correlação com a temperatura. A salinidade da água é medida pela sua condutividade elétrica, tendo como unidades de medidas dS m^{-1} , μmho , $\mu\text{S cm}^{-1}$. Segundo Oliveira et al. (2006), a água de açudes no semiárido utilizados para a irrigação pode chegar a grandes magnitudes de condutividade elétrica. No que concerne a essa questão, medidas de condutividade elétrica foram feitas em águas coletadas no açude Jacaré, no município de Remígio, PB.

Os valores medidos foram em média $24,5 \text{ dS m}^{-1}$, e representam aproximadamente 24.000 % superiores aos valores de condutividade da água de precipitação pluvial, que estão em torno de $0,01 \text{ dS m}^{-1}$, são valores aproximados de água destilada, sem a presença de sais. Nas microbacias onde estão instalados os sensores de vazão, foram medidos valores de condutividade elétrica da água do escoamento superficial, esses valores na média estão em torno de $0,03 \text{ dS m}^{-1}$. Os valores de condutividade observados na água de escoamento superficial das microbacias são próximos da água da chuva, por conseguinte, não há incidência significativa de sais na água do escoamento superficial, cuja vazão é medida pelo sensor.

3.4. Resultados

Inicialmente, foi feita uma calibração dos sensores de nível no laboratório, um sensor para cada bacia. Na Figura 31, observa-se o resultado dessa calibração do sensor para a bacia B1, ilustração a, e o sensor para a microbacia B2, ilustração b. Fez-se uma relação da saída do transdutor em frequência com altura da coluna de água. Para a medição da frequência de saída do oscilador foi utilizado o SAD desenvolvido nesse trabalho. O SAD foi conectado a um computador para realizar medidas de frequência do oscilador do sensor com intervalos de 1 s. A medida do nível de coluna de água do ensaio, foi obtida por intermédio de um piezômetro instalado em um tubo tranquilizador de líquidos.

Figura 31 – Gráfico de calibração do sensor de nível da coluna de água da calha pashell da micro-bacia B1 (a) e da microbacia B2 (b)



Fonte: Alves, 2008.

A Tabela 4 informa as relações entre o nível da coluna de água no tubo tranquilizador da calha Parshall e a frequência na saída do sensor. Dessa maneira, pode-se obter, a vazão do curso de água, por intermédio da equação de calibração exponencial. Para cada microbacia ou cada sensor é utilizada um equação de calibração específica. A coluna que faz referência à Figuras, trata-se da Figura 30a e 30b.

Tabela 4 – Locais de instalação, equações e fatores de rejeição da coluna d'água da calha Parshall.

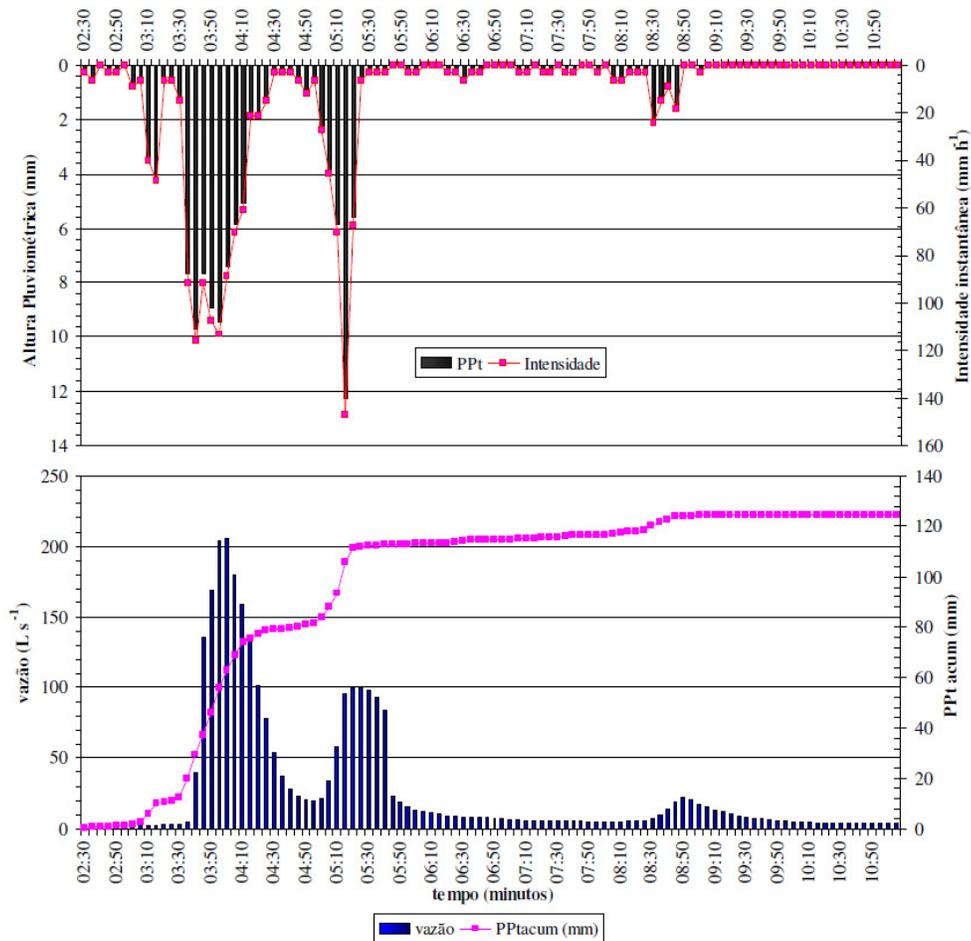
Micro-bacia	Sensor	Equação	R ²	Figura
	sonda	-	-	-
B1	4	Freq = 83683Hm ^{-0,7282}	0,975	a
B2	2	Freq = 74631Hm ^{-0,8498}	0,977	b

Fontes: Alves, 2008.

O monitoramento e o registro de um evento ou evento extremo de precipitação pluvial e seu escoamento superficial são de grande importância para identificação e compreensão de dinâmicas das variáveis ambientais em uma microbacia. Os modelos idealizados para reproduzir os processos que ocorrem na microbacia devem buscar a convergência com a representação gráfica desses dados. A Figura 31 representa um exemplo obtido no campo experimental, de registro do resultado dos dados monitorados pelo sensor de vazão (linímetro + calha parshall) desenvolvido nesse trabalho. Os dados pluviométricos também foram coletados pelos pluviômetros construídos neste trabalho. Rodrigues (2009) observou o início da precipitação pluvial às 2 horas 30 minutos e o primeiro registro de escoamento no exutório ocorreu às 3h e 35 minutos. A vazão do escoamento superficial monitorada pelo sensor era de 4 l s⁻¹. Após 5 minutos, o sensor monitora uma elevação da vazão de 39,8 l s⁻¹. O pico de descarga de água, também é uma variável importante nas medições obtidas pelo sistema. Pelo hidrograma da Figura 32 pode-se verificar que o pico de descarga acontece com um atraso de aproximadamente 5 minutos do pico de intensidade de chuva, assim, o tempo de concentração estimado para esta

microbacia é de aproximadamente 5 minutos, resultado importante na simulação de processos hidrológicos na microbacia.

Figura 32 - Precipitação, intensidade e descarga para o evento do dia 12 de março de 2008, na microbacia B2



Fonte: Rodrigues, 2009.

Não obstante, o emprego de regressões múltiplas, a complexidade de se encontrar correlações em modelagens hidrológicas é alta (RODRIGUES 2009 apud ALENCAR, SILVA E OLIVEIRA 2006). A Tabela 5 ilustra essa premissa por intermédio da medição anual dos eventos monitorados pelos sensores desenvolvidos no trabalho proposto. Pela avaliação dos eventos dos dias 30 de janeiro e 18 fevereiro, por exemplo, nota-se que estes tiveram intensidade de chuva, com mesma amplitude, o primeiro chegando a um valor de 62,22 mm h⁻¹ contra 61,71 mm h⁻¹ do

segundo. Entretanto, as respostas foram totalmente diferentes quanto à vazão de pico, sendo o pico de descarga do dia 18 de fevereiro aproximadamente dez vezes superior ao do dia 30 de janeiro. A disponibilidade dos equipamentos de medição e registro dos dados permite então calibrar modelos aplicados em estudos ambientais.

Tabela 5 – Características hidrológicas da microbacia B2 para o ano de 2009.

Microbacia 2 (B2)							
Evento	PPt (mm)	Duração (h)	Q _{max} (L s ⁻¹)	LE (mm)	C (%)	V (m ³)	I ₃₀ (mm h ⁻¹)
30/01/09	76,50	3,25	16,23	1,34	2	27,56	62,22
04/02/09	15,55	1,00	0,50	0,06	0,4	1,14	26,01
12/02/09	43,60	3,17	8,10	0,99	2	20,33	40,29
13/02/09	10,71	1,08	0,90	0,11	1	2,31	12,24
18/02/09	47,43	2,75	168,10	12,06	25	248,81	61,72
28/02/09	18,87	1,25	1,38	0,15	1	3,19	21,42
04/03/09	26,01	2,42	90,85	8,65	33	178,52	29,58
18/03/09	42,42*	3,75	76,21	6,05	14	124,90	29,46
12/04/09	34,29*	2,83	2,18	0,16	0,5	3,36	49,78
13/04/09	24,13*	3,00	7,46	1,06	4	21,96	18,79
15/04/09	49,27*	5,00	64,06	9,40	19	194,07	38,1
17/04/09	39,87*	2,25	139,65	12,56	32	259,27	49,27
19/04/09	28,44*	1,50	29,06	4,19	15	86,55	32,51
20/04/09	13,71*	2,25	2,26	0,55	4	11,45	15,74
22 e 23/04	50,00*	7,67	12,00	6,82	14	140,83	20,8
24/04/09	23,36*	2,50	41,93	6,51	28	134,34	19,81
25/04/09	24,89*	2,67	33,34	4,94	20	101,88	26,41
28/04/09	19,05*	1,25	25,38	2,82	15	58,24	26,92
30/04/09	29,21*	0,75	139,94	11,50	39	237,33	55,88
01/05/09	14,98*	1,17	12,15	1,10	7	22,35	11,17
08/05/09	22,86*	1,92	72,39	7,18	31	148,26	36,57
09/05/09	8,63*	0,58	4,08	0,56	7	11,61	16,25
10/05/09	12,91*	2,75	8,39	1,87	14	38,56	8,63
13/05/09	20,06*	0,83	46,35	2,56	13	52,75	36,06
15/05/09	10,92*	1,17	6,26	1,04	9	21,37	15,24
média		2,37	40,36	4,17	14	86,04	29,79
D.P.		0,02	0,49	0,04	0,12	0,85	0,15

*Dados extraídos do pluviógrafo da microbacia B4

Precipitação (PPt), duração da precipitação (Duração), vazão de pico (Q_{max}), lâmina escoada (LE), coeficiente de *runoff* (C), volume escoado (V) e intensidade máxima para intervalos de 30 minutos (I₃₀).

Fonte: Rodrigues 2009.

Apesar da resposta satisfatória dos sensores de nível capacitivos de placas planas no campo experimental, no momento da calibração no laboratório e

observando o desempenho nas microbacias, observaram-se problemas geradores de falhas na robustez de funcionamento dos sensores:

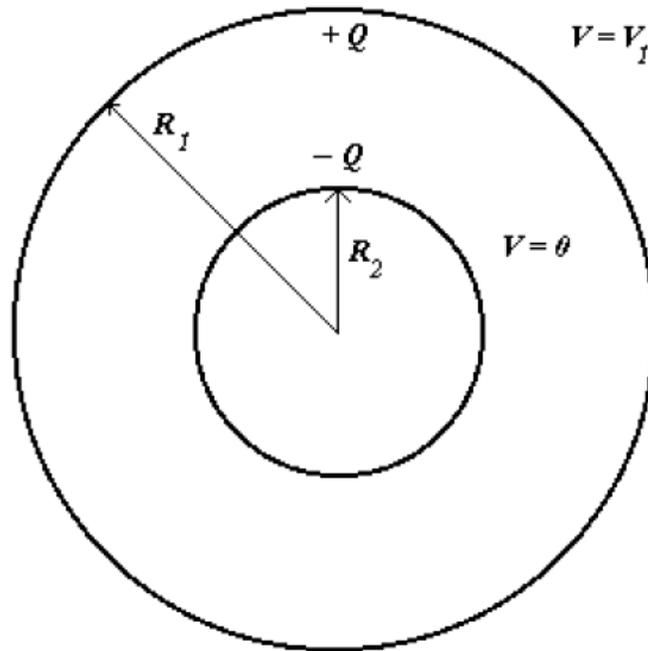
- Os sensores de nível de placas planas eram sujeitos a ruídos por conta de campos eletrostáticos, magnéticos e eletromagnético gerados pela aproximação de equipamentos, como instrumentos de medição, motores e corpo humano.
- Ruídos provenientes de harmônicos da rede elétrica ou deficiência no aterramento do sistema.
- Baixa robustez ao transporte e manuseio na instalação.
- Necessidade de calibração individual para cada sensor confeccionado.
- Ruído causado pela alta frequência gerada pelo sensor.
- Sinal de saída do sensor não linear.

Em decorrência desses problemas, foi desenvolvida nova arquitetura de montagem do sensor para melhorar o desempenho do linímetro capacitivo. A arquitetura desse novo sensor é baseado em um capacitor de placas concêntricas.

3.5. Projeto e desenvolvimento de sensor de nível de placas concêntricas

Na perspectiva de melhorar a robustez mecânica, estabilidade do sinal eletrônico, evitar ruído de indução eletromagnética e garantir a linearidade do sinal do sensor, um novo linímetro baseado no capacitor concêntrico foi projetado e calibrado. Na Figura 33, observa-se a seção transversal de um capacitor cilíndrico de comprimento L (cm), formado por dois cilindros coaxiais de raios $R1$ (cm) e $R2$ (cm), em que $L \gg R1$, de modo que, pode-se desprezar a distorção do campo elétrico que ocorre nas extremidades dos cilindros. O cilindro interno é a placa negativa do capacitor, carregada inicialmente com carga (coulomb) negativa ($-Q$) e o cilindro externo é placa positiva do capacitor, carregada inicialmente com carga positiva ($+Q$). Para aplicar o potencial negativo à placa negativa, ela é submetida a um potencial nulo ($V=0$) em relação referência com o terra. Por outro lado, a placa positiva é submetida a uma tensão elétrica $V=V1$.

Figura 33 – Seção transversal de um capacitor cilíndrico com raios R_1 e R_2



Fonte: Carvalho e Silva, 2002.

A equação que determina a capacitância, quando o espaço entre as placas, é preenchido com um material dielétrico é dada por (CARVALHO et al., 2002):

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon \frac{L}{\ln\frac{R_1}{R_2}} \quad (5)$$

Pode-se assim construir um capacitor com placas cilíndricas de um determinado comprimento L (cm), com capacitância maior que um capacitor de placas planas com o mesmo comprimento L (cm).

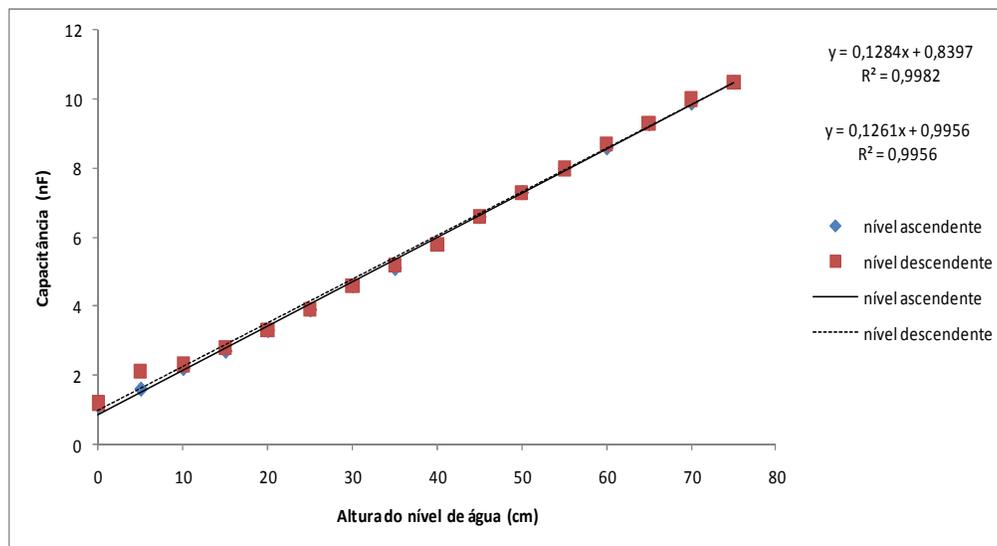
A principal vantagem dessa nova geometria é o valor da capacitância obtida. Pela Figura 34, pode-se observar que esse valor vai de 1000 pF (placas preenchidas com ar) a 10000 pF (placas preenchidas com água), já no capacitor de placas planas, para um linígrafo de mesmo comprimento, a capacitância gira em torno 8 pF a 100 pF. Pela Figura 33, a linearidade pode ser apresentada como outra vantagem, ela é quantificada pelo coeficiente de determinação (R^2) para o ajuste apresentado pelas equações 6 e 7,

referentes respectivamente aos processos de preenchimento (0,9982) e secamento (0,9956).

$$y = 0,1284x + 0,8397 \quad (6)$$

$$y = 0,1261x + 0,9956 \quad (7)$$

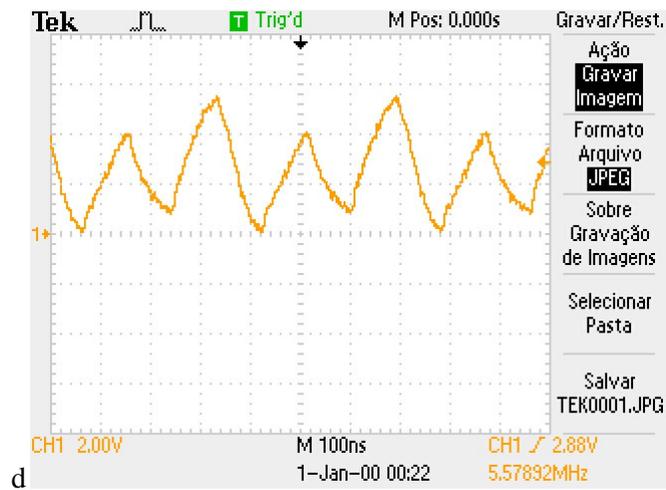
Figura 34 - Curva de calibração mostrando o comportamento da capacitância em relação à altura do nível de água.



Fonte: Autor.

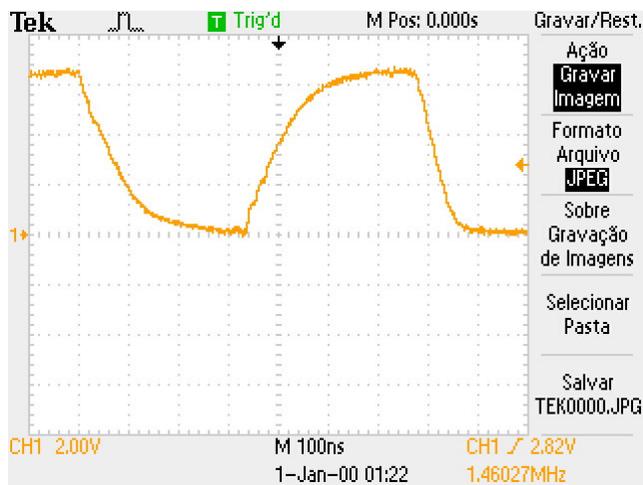
A maior capacitância torna o oscilador do circuito eletrônico menos instável. Pode-se observar uma evidência dessa premissa analisando a Figura 35a e Figura 35b e comparando-as com as Figura 35c e Figura 35d, respectivamente. Estas ilustrações são as formas de ondas do sinal do sensor de nível de placas planas, representadas pelas Figuras 35a e 35b, e do sensor de nível de placas concêntricas, representadas pelas Figuras 35c e 35b. As formas de onda no sensor de placas concêntricas apresentam uma onda quadrada bem definida, facilitando a medição por processadores eletrônicos, resultando em leituras mais estáveis.

Figura 35a – Forma de onda com nível de água mínimo, monitorado pelo sensor de placas planas



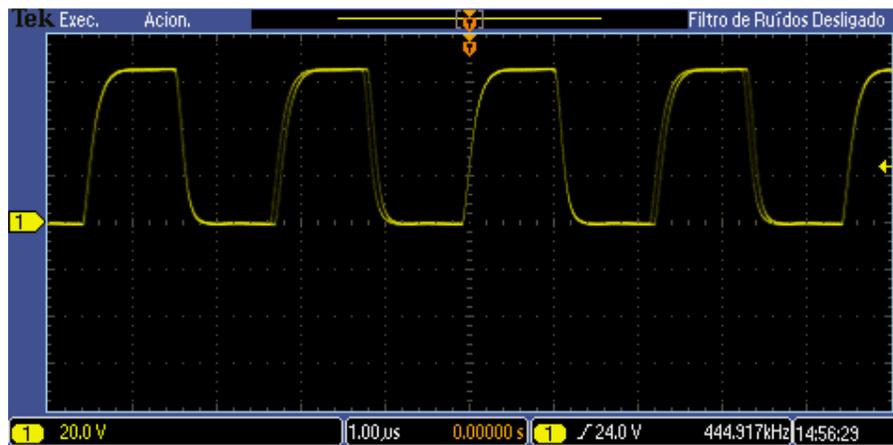
Fonte: Autor

Figura 35b – Forma de onda do sensor de placas planas, monitorando o nível máximo de água.



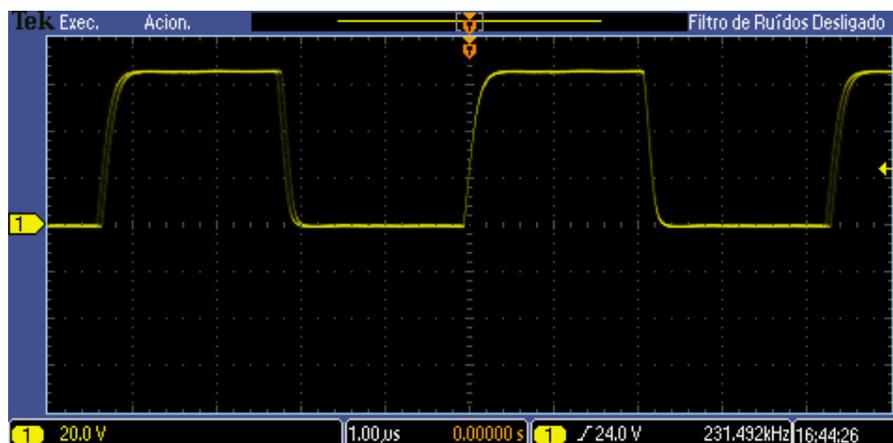
Fonte: Autor

Figura 35c – Forma de onda do sensor de placas concêntricas, monitorando nível de água mínimo.



Fonte: Autor

Figura 35d – Forma de onda de frequência do sensor de nível de placas concêntricas, monitorando nível de água máximo.

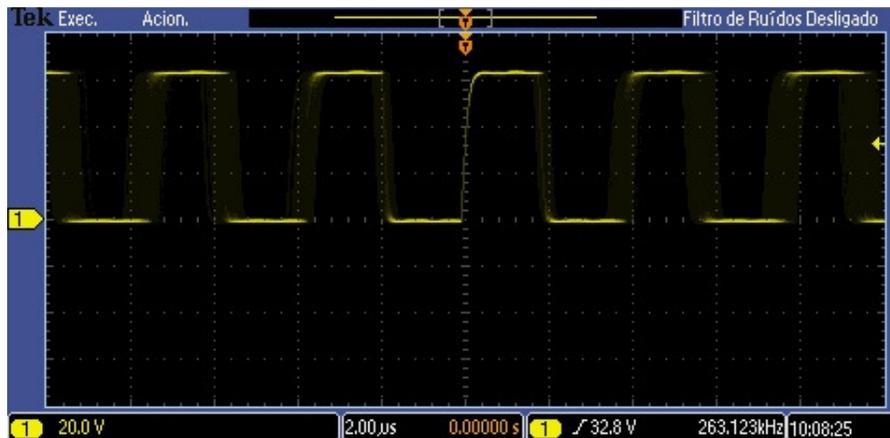


Fonte: Autor

A nova arquitetura permitiu uma melhora substancial na estabilidade do sensor. Posto que, as formas de onda bem definidas, permitem melhorar a imunidade do sensor a ruídos e uma leitura com maior precisão pelos processadores utilizados. A interferência eletromagnética, interferência eletrostática e até mesmo indução por

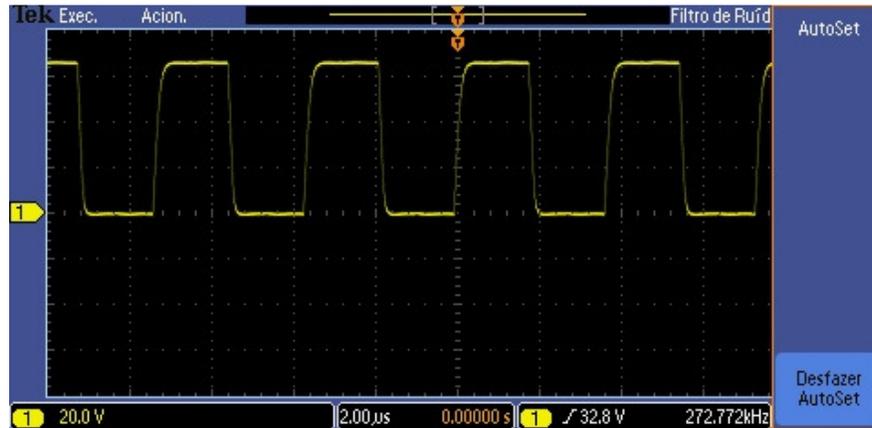
proximidade ou contato com as placas do capacitor sonda foram atenuadas pela utilização externa da placa negativa. Usando a placa negativa do capacitor concêntrico externamente, ela atua como gaiola da Faraday para campos magnéticos e eletrostáticos, ou seja, é feita uma blindagem para campos eletromagnéticos. A Figura 36a ilustra o efeito do contato da mão do operador, quando se utiliza a placa positiva do capacitor externamente, sem o toque, o instrumento lê uma frequência de aproximadamente 272 kHz, com o contato essa leitura de frequência é de 263 kHz aproximadamente. A figura 36b, ilustra o comportamento do sensor, quando a placa negativa do capacitor é montada externamente, a blindagem garante uma leitura de aproximadamente 272 kHz, mesmo com o contato da mão do usuário.

Figura 36a – Forma de onda gerada pelo sensor com ruído gerado pelo contato externo na placa positiva



Fonte: Autor.

Figura 36b – Forma de onda gerada pelo sensor utilizando placa concêntrica negativa externa.



Fonte: Autor.

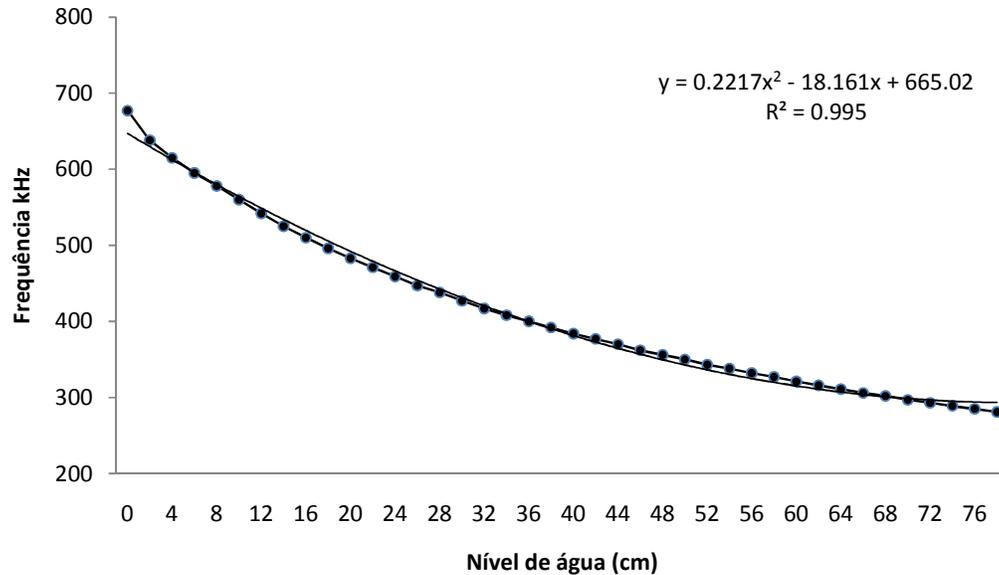
A melhora obtida, pela nova arquitetura do projeto das sondas do sensor, proporcionou uma capacitância mais alta, com a saída do oscilador podendo variar de 300 kHz a 700 kHz (Figura 37), com um sinal menos sujeito a ruídos e com leitura menos complexa do microcontrolador, enquanto sinal do oscilador do sensor de nível de placas planas pode chegar a 4.000.000 Hz, ficando sujeito a ruídos e falhas, na leitura do microcontrolador, por conta da alta frequência do sinal.

Utilizando um piezômetro, foi feita a calibração do sensor nível de placas concêntricas, cujo resultado é expresso na Figura 36, por intermédio da curva de calibração de altura da coluna de água versus frequência, por conseguinte é gerada uma equação quadrática dada por:

$$y = 0,2217x^2 - 18,161x + 665,02 \quad (8)$$

Onde y é igual à frequência de saída do sensor e x é nível da coluna de água em um tubo tranquilizador da calha Parshal.

Figura 37 – Variação do sinal de saída do sensor de nível capacitivo com placas concêntricas em função da variação do nível de água



Fonte: Autor

Após a calibração no laboratório do sensor de nível capacitivo com placas concêntricas, estes foram instalados no campo experimental, substituindo os sensores de nível capacitivo de placas planas. A calibração nesse caso, é feita apenas em um sensor, pois quando não há convergência do sinal de saída de algum sensor no nível zero com o sensor calibrado, os demais podem ser ajustados por intermédio de um trimpot de ajuste fino, facilitando a utilização dos instrumentos. A Figura 38 ilustra o momento de um escoamento superficial, sendo monitorado pelo sistema de medição de vazão desenvolvido nesse trabalho.

Figura 38 – Funcionamento do sensor de vazão no campo experimental.



Fonte: Santos, 2012

3.6. Conclusão

A disponibilidade do sensor de vazão por conta do desenvolvimento com tecnologia e material encontrado no âmbito local permitem manter o SAD funcionando permanentemente.

A estratégia de monitoramento de variáveis do escoamento superficial em microbacias do semiárido, com inovação de sensor eletrônico de baixo custo e armazenamento de dados automáticos, com base em microcontrolador, se mostrou eficiente na coleta e armazenamento de dados. Os dados coletados possibilitaram a construção de hidrogramas dos corpos hídricos das microbacias do campo experimental. O monitoramento da vazão do curso de água e da precipitação na bacia experimental, por intermédio dos sensores desenvolvidos, possibilitou o estabelecimento do tempo de concentração da bacia (5 minutos) para eventos específicos.

O desenvolvimento do sensor de baixo custo possibilitou a instalação de uma densidade alta de pontos de medição na microbacia, o que diminui a incerteza epistêmica do estudo. Dessa maneira, é facilitada, a análise e a tomada de decisão, por parte dos gestores e administradores, de questões pertinentes ao manejo adequado de utilização de bacias.

A arquitetura inovadora de projeto das placas do capacitor sonda permite obter maior robustez na estabilidade do sinal de saída dos sensores capacitivos de nível.

O instrumental adotado permite medir parâmetros essenciais à validação de diversos modelos aplicados no estudo do comportamento ambiental do semiárido.

4. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO SENSOR INDUSTRIAL, NA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA, COMO ALTERNATIVA AO SENSOR DE TEMPERATURA AMBIENTAL

4.1. Introdução

O monitoramento ambiental com a finalidade de estudos hidrológicos ou mesmo na agricultura de precisão, em muitos casos, se torna oneroso e com descontinuidade no registro de dados. O custo é alto por causa do preço de sensores importados e as falhas no registro de dados são decorrentes do fato, desses equipamentos não serem produzidos no Brasil, os quais possam suprir uma eventual substituição dos mesmos. Diante dessas premissas, pode-se buscar sensores em uso corrente na Indústria para substituir sensores dedicados importados. A temperatura em instrumentação ambiental e industrial é uma das medições mais básicas. Dessa maneira o objetivo desse capítulo é verificar a convergência da medição de sensores de temperatura de cada área em particular e condicionar o sensor industrial em SDA ambiental. O sensor de uso comum para medição de temperatura é o LM 35 e o sensor utilizado em monitoramento ambiental é o HMP 45C.

4.2. Metodologia de condicionamento e calibração de sensor industrial de temperatura para monitoramento ambiental

4.2.1. Especificações do sensor de temperatura usado em aplicações industriais

Sensores de temperatura de semicondutores de uso industrial estão disponíveis com saídas de sinal analógico e digital, e em uma variedade de formas e tamanhos. Sensores podem ser montados em uma placa de circuito eletrônico ou ligados a fios para fabricar sondas de temperatura para monitoramento remoto em SAD. Na medição da temperatura do solo foram utilizados o LM35 e termopares. Sensores de temperatura analógicos, como LM35, fornecem uma saída de tensão elétrica que é linearmente proporcional à temperatura em graus Celsius (um sensor similar, o LM34, fornece a tensão de saída proporcional à temperatura em graus Fahrenheit). O sensor LM35A é calibrado em graus Celsius de saída com um simples fator de escala de 10 mV / °C. Não são necessários quaisquer componentes externos, e a precisão é tipicamente $\pm 0,5$ °C

(NATIONAL, 1995). Este circuito integrado responde com uma variação de 10 mV em sua saída para cada °C, ou seja, na topologia de ligação adotada nessa avaliação a tensão de saída varia com a temperatura de 0 a 1,5 V. O sensor tem um custo estimado em torno de R\$ 0,30, e pode ser adquirido no comércio local.

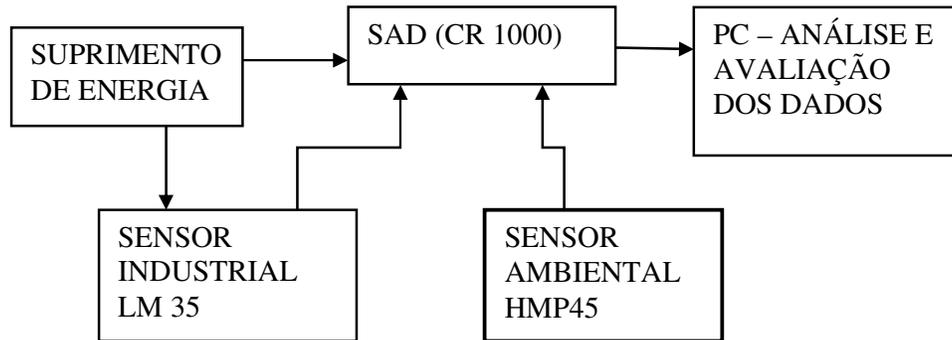
4.2.2. Especificações do sensor de temperatura ambiental

Um sensor de temperatura de uso generalizado em estações meteorológicas ou hidrológicas é o HMP 45C, pode medir temperaturas entre -40 e 60 °C. O princípio de funcionamento é a resistência elétrica variável com a temperatura. A saída do sensor fornece uma tensão elétrica de 0,008 a 1 V (CAMPBELL, 2009) . O custo desse sensor está em torno de R\$ 4.000,00. O equipamento é importado, quando é encontrado no Brasil, são filiais do fabricante que somente o importam.

4.2.3. Ensaio de avaliação de convergência da medição dos sensores

No ensaio de comparação dos sensores, foi utilizado um SAD comercial de alto desempenho, esse SAD é usado em estações hidrológicas e meteorológicas em todo mundo, sendo CR1000 a referência de fábrica. O CR 1000 pode ser programado para medir tensões elétricas com precisão. O fundo de escala disponível para essas medições varia de 2,5 mV a 5000 mV (CAMPBELL, 2013). Por intermédio de programação do instrumento, pode-se escolher a escala mais adequada. As vias de conexão para a medição de tensão podem ser diferenciais ou com terra comum. O conhecimento da metodologia de conexão de sensores, de uso generalizado no ambiente industrial, a SAD ambientais é um dos obstáculos a utilização desses sensores em estações de monitoramento ambiental. Assim, no ensaio de comparação entre os sensores é importante apresentar o diagrama de conexão desses sensores ao SAD. Inicialmente um diagrama de blocos é apresentado para uma visão geral do fluxo de dados e energia (Figura 39).

Figura 39 - Diagrama de blocos da bancada de ensaio de sensores de temperatura

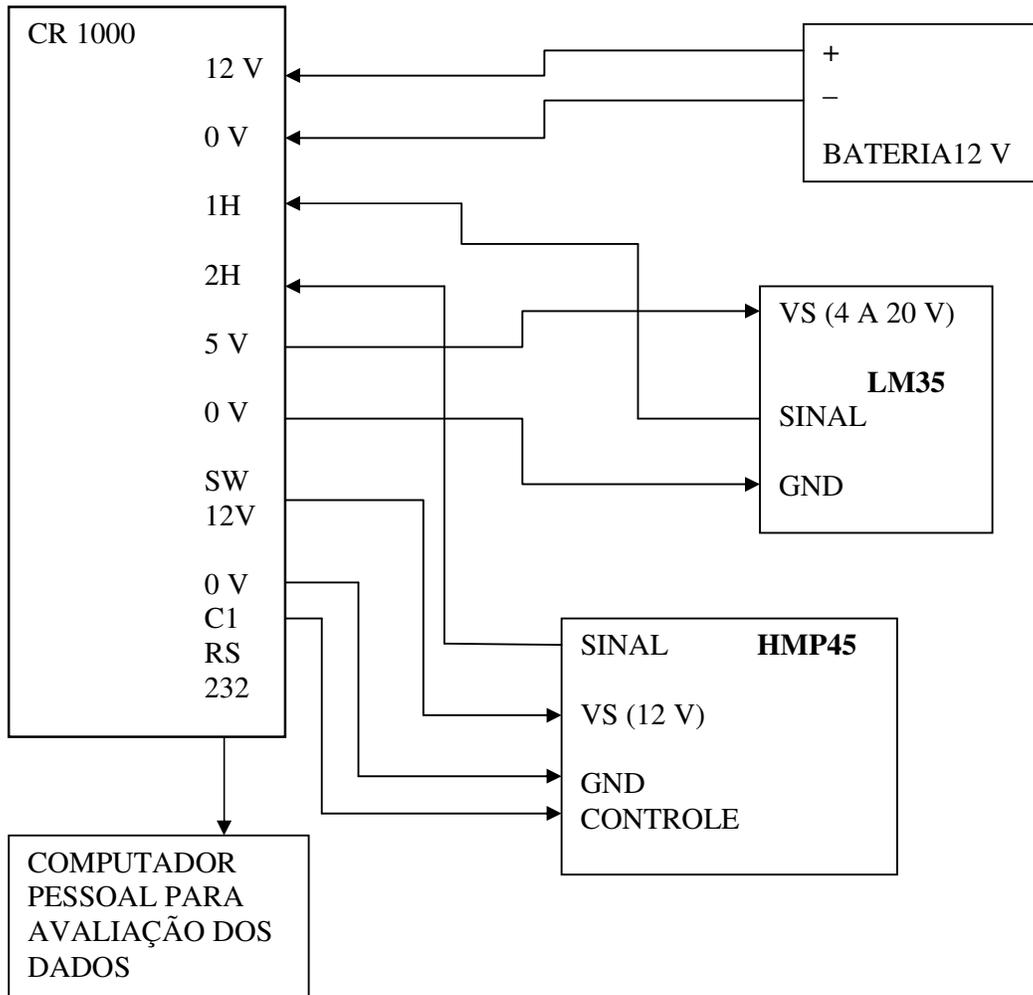


Fonte: Autor

O CR 1000 tem a função de monitoramento, armazenamento de dados, controle dos sensores e suprimento de energia. Nesse caso a função de controle é no período de armazenamento das variáveis dos sensores e na regulação do suprimento de energia para o sensor HMP 45C. O diagrama de blocos da Figura 38 mostra uma característica do sensor industrial, há uma seta da fonte de energia para o sensor, por conseguinte, pode-se suprir este sensor com fonte de energia independente do SAD. A fonte de energia para o LM 35 pode ter uma saída de tensão variável, no mínimo 4 V e no máximo 20 V. Finalmente, o diagrama multifilar dos instrumentos é mostrado na Figura 39.

No diagrama multifilar da Figura 40, foram utilizados vias de acesso para medição de tensão com terra comum do SAD, onde a via de conexão 1H, monitora o sinal do sensor de temperatura industrial e a via de conexão 2H, recebe o sinal de tensão elétrica do sensor de temperatura ambiental. A escala configurada na programação foi de 2.500 mV. A seleção da escala foi baseada nos critérios de resolução e amplitude do sinal de tensão gerado pelos sensores. A amplitude máxima de sinal do sensor LM 35 é 1.500 mV e o sensor HMP 45 gera uma saída máxima de sinal de 1.000 mV. Assim, utilizando 2.500 mV, como fundo de escala, o valor máximo da tensão de saída dos dois sensores será, sempre menor, que seu fundo de escala.

Figura 40 – Diagrama multifilar de conectividade dos sensores com SAD



Fonte: Autor

O CR1000 pode ser configurado para leituras com fundo de escala de 250 mV, nesse caso uma melhor resolução de leitura é obtida, não obstante, sinais de tensão de máximos de temperatura podem exceder a esse fundo de escala. A temperatura ambiente no semiárido no período diurno geralmente está entre 30°C e 38°C; partindo desse princípio, para uma temperatura ambiente de aproximadamente 38 °C a tensão do sinal de saída do LM 35 é de 390 mV. O valor dessa tensão é maior que o fundo de escala de 250 mV, inviabilizando a medição.

O sensor HMP 45C já tem uma função específica na plataforma de programação do CR 1000. Essa função configura todos os parâmetros necessários para a leitura dos

sinais dos sensores e sua conversão de sinal elétrico em valores de temperatura, por sua vez, o LM 35 não tem essa função, sendo necessária proceder uma calibração para a conversão de sinal de tensão elétrica em valores de temperatura. Inicialmente, é necessária uma temperatura de referência, que pode ser a temperatura interna do SAD, pois esta variável já exerce uma função que configura a leitura de temperatura, a qual vai ser usada como referência. Assim, por intermédio de programação do SAD, obtêm-se leituras em mV do LM 35, sendo esse procedimento necessário para a aquisição dos dados que serão utilizados nos cálculos do parâmetro, o qual permitem a conversão de tensão elétrica em temperatura. Esse parâmetro é configurado na programação do SAD. Os dados coletados com o programa do SAD para configuração de parâmetro para calibração do LM 35 são mostrados em sequência:

- Dado do CR1000 em mV de sinal de saída do LM35 (V_{slm35}): 250
- Dado da temperatura padrão em °C (T_p) obtida no SAD =24,5764

O parâmetro de calibração Pc é dado por:

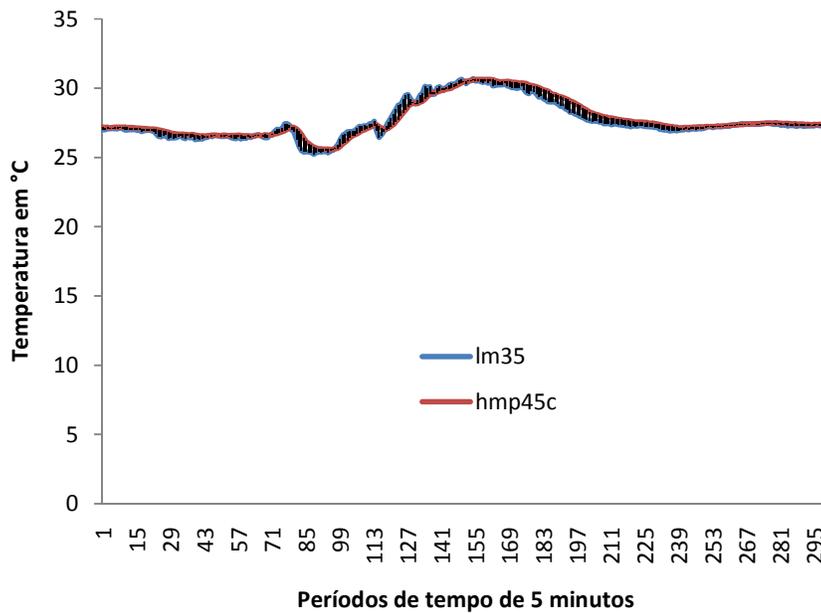
$$Pc = \frac{T_p}{V_{slm35}} = \frac{24,5764}{250} = 0,0983056 \quad (6)$$

O parâmetro de calibração (Pc) é uma constante, que é utilizada na configuração do programa ,do *data logger*, para converter o sinal de tensão medido pela via de coleta de dados do sistema de aquisição dos mesmos.

4.3. Resultados

Com o intuito de comparar e avaliar os sensores, foi instalado no SAD, um programa com o parâmetro de configuração para a conversão de tensão elétrica em temperatura. Este programa foi configurado para ler os dados em valores de temperatura de 1 em 1 minuto e armazenar a média a cada 5 minutos, com o objetivo de verificar a divergência ou convergência dos dados do sensor LM 35 e do sensor HMP 45C. A Figura 40 apresenta um gráfico com os valores de temperatura dos dois sensores por um período total de aproximadamente 24 horas. Observando o gráfico da Figura 41, verifica-se que a temperatura entre os dois sensores apresenta boa convergência.

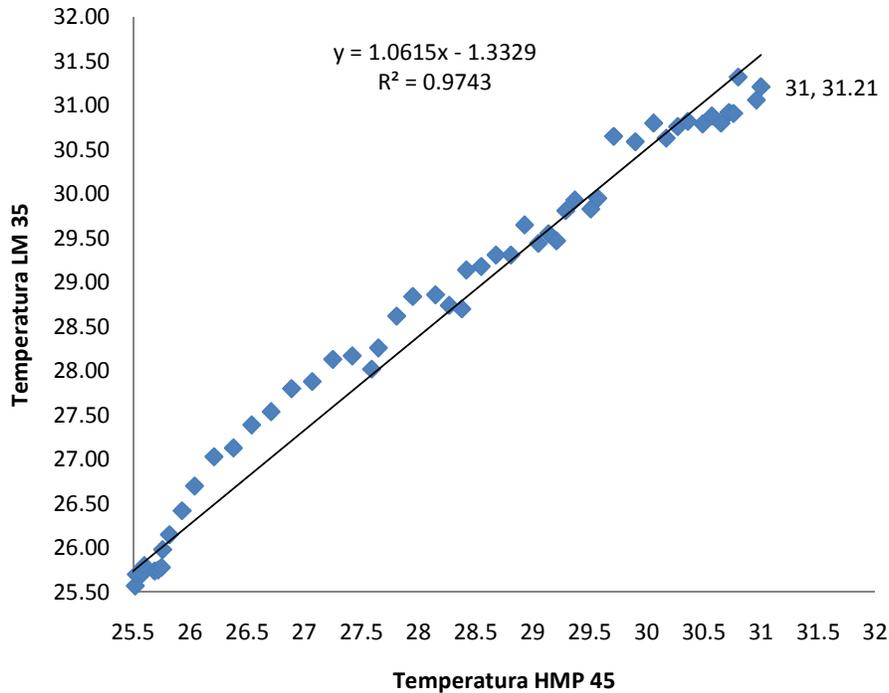
Figura 41 – Comparação de desempenho de sensores de temperatura



Fonte: Autor

A correlação ideal, entre as medições de temperatura entre os sensores, pode ser avaliada, por intermédio da utilização dos dados monitorados e armazenados no SAD, para a obtenção de pontos que formem uma linha reta com um coeficiente angular igual a 1. No entanto, muitos fatores podem afetar esse desempenho ideal, como o ruído eletromagnético e diferenças construtivas dos sensores. O coeficiente angular da reta linear mais próxima dos pontos é de 1,0615. Na Figura 42, o material e a tecnologia de fabricação dos sensores traduz a divergência de correlação entre as temperaturas monitoradas pelos sensores. Enquanto o LM35 utiliza as características dos semicondutores, como sonda diante da variação de temperatura, e é fabricado em grande escala e portanto o controle de qualidade não é tão rígido, o HMP45 utiliza material diferenciado (resistência de platina) para sua fabricação e cada sensor é calibrado com base em normas rígidas.

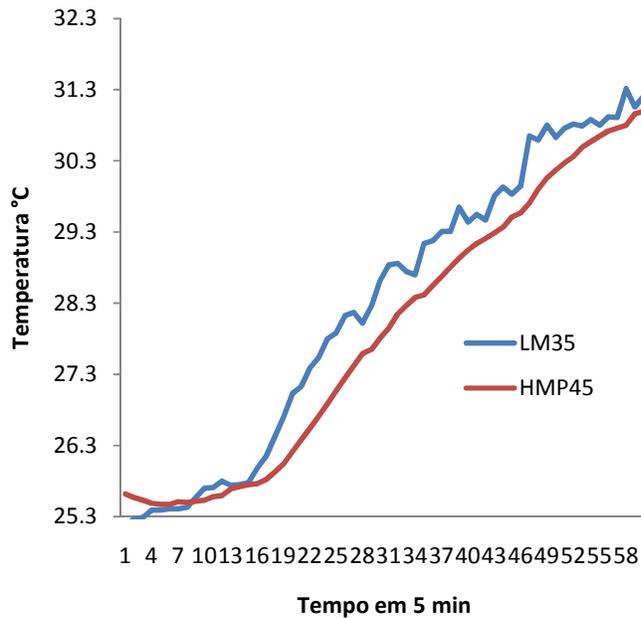
Figura 42 – Avaliação da convergência à linearidade do sensor de Temperatura LM 35 com HMP 45C.



Fonte: Autor

A variação de temperatura e umidade relativa do ar, em ambientes naturais, acontece suavemente na dimensão temporal com ordem de minutos. Em ambientes naturais do semiárido brasileiro, essa variação também não alcança uma grande diferença entre máximos e mínimos (amplitude térmica). Observando a variação dos dados de temperatura na Figura 43, constata-se que o sensor LM 35A apresenta em alguns pontos, comportamento divergente da variação suave de temperatura na natureza. A resposta de temperatura do sensor HMP 45C apresenta uma curva mais suave, mostrando coerência com a variação de temperatura na natureza. Em alguns dados, essa divergência pode ser de aproximadamente 0,5 °C. Para a maioria das aplicações, divergências de 0,5 °C são desprezíveis. No entanto, essas divergências não ocorrem em todos os pontos, abrindo a possibilidade de tratamento dos dados por software de uso geral.

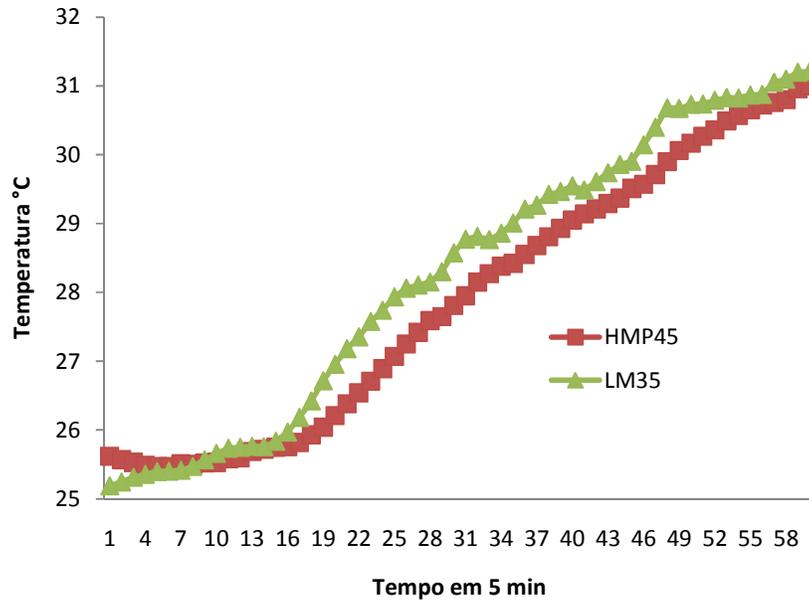
Figura 43 – Variação da medição de temperatura com o tempo



Fonte: Autor

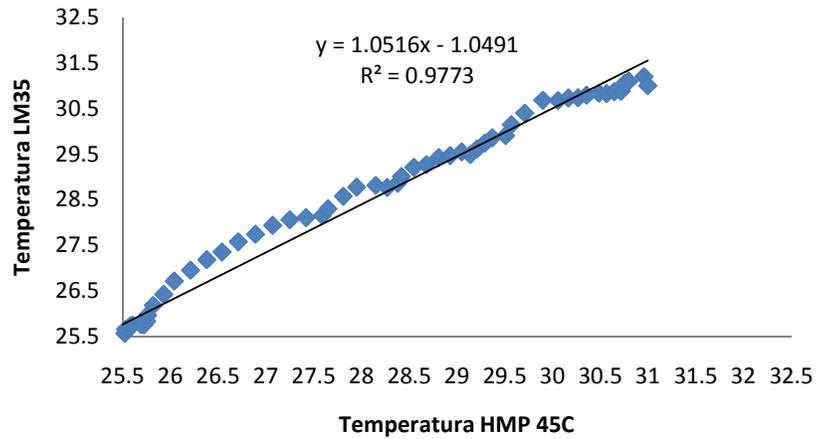
A Figura 44 ilustra um tratamento simples feito nos dados com planilha eletrônica. Uma média simples entre três pontos, utilizando a média móvel com janela de três pontos, fazendo essa operação para todos os pontos. Essa operação já suavizou as linhas geradas pelos pontos de temperatura gerados pelo LM35. Utilizando funções matemáticas, lógicas e estatísticas com ferramentas de *software*, a utilização dos dados pode ser expandida para outras aplicações. O tratamento dos dados permite melhorar a convergência dos dados fornecidos pelos sensores, com a variação da temperatura esperada no ambiente natural. A importância de utilização do tratamento estatístico, pode ser notada, com o aumento do coeficiente de correlação r^2 da reta linear na equação da Figura 45, em relação ao observado na equação da Figura 42.

Figura 44 – Tratamento discreto da divergência entre as medidas dos sensores de temperatura



Fonte: Autor

Figura 45 – Convergência de medidas de temperatura dos sensores após tratamento de software.



Fonte: Autor.

4.4. Conclusões

A utilização de instrumentos usados em larga escala industrial e no monitoramento ambiental, possibilita o adensamento de pontos de monitoramento sem grande aporte de recursos financeiros, viabilizando a densidade necessária dos pontos de medição. Esses instrumentos, sendo feitos com componentes encontrados com facilidade no comércio, viabilizam a manutenção do sistema e por conseguinte, a continuidade de coleta de dados.

O tratamento de dados, como exemplificado com o LM35, com métodos matemáticos, estatísticos e lógicos, com a utilização de software pode ampliar a aplicação dos sensores no meio ambiente.

5. DESENVOLVIMENTO DE PLUVIÔMETROS PARA CARACTERIZAÇÃO DA PPT EM REGIÕES SEMIÁRIDAS

5.1. Revisão de literatura

5.1.1. História dos pluviômetros

A Índia traz a primeira contribuição para medida da precipitação registrada de forma escrita. O documento é datado do século quarto antes de Cristo. A medição foi feita em tigelas com um diâmetro aproximado de dezoito polegadas e trazia o acumulado de chuvas de regiões específicas do país. A Palestina vem a seguir com histórico escrito de medições de chuva. As medidas de precipitação dessa região são do século II AC ao século II DC. Nesse documento, a medição foi distribuída ao longo de três períodos anuais. No primeiro período obteve-se 1 *tefah* (equivalente a 90 mm), o segundo período mediu-se 2 *tefah* e finalmente o terceiro período o valor da medição foi de 3 *tefah*, assim a medição anual foi de 6 *tefah* (equivalente a 540 mm). As referências de medição da chuva na Índia e na Palestina trazem como justificativa para esses registros, o uso em Agricultura. Atualmente os registros de chuvas anuais na região da Palestina variam de 150 mm a 700 mm por ano (STRANGWAYS, 2010).

A Agricultura sempre foi a principal motivação para adoção da medição da precipitação, por sua vez, os chineses buscaram essa medição em decorrência das inundações de rios e canais provocadas pelas chuvas. Esta preocupação dos chineses remonta ao ano 1247, onde eram usados pluviômetros cônicos para coleta do volume de água dos eventos. O controle do volume de água das chuvas para o cultivo do arroz na Coreia foi provavelmente o que levou a utilização de pluviômetros nesse país, a partir de 1441 e foram utilizados continuamente até 1907. É importante salientar que a reinvenção dos pluviômetros e a medição quantitativa de chuva pela China e pela Coreia são os maiores arquivos hidrológicos e meteorológicos por pelo menos 1300 anos. A repressão religiosa na Europa, por sua vez, foi a principal causa dessa lacuna no conhecimento. (STRANGWAYS, 2010).

Uma nova forma de ver o mundo passou a existir na Europa do século XVII, e a técnica de medir precipitação foi abraçada por muitos. O precursor da era moderna dessas técnicas foi Benedetto Castelli (1578-1643), seguido por Sir Christopher Wren (1632–1723) e Robert Hooke (1635–1703). Alguns já começaram a obter série de dados de precipitação, como Gilbert White (1720-1793) que a registrou conforme a tabela 6.

No entanto quem montou uma série com maior número de observações, nesse período, foi Thomas Barker que mediu a precipitação por 59 anos (STRANGEWAYS, 2010).

Tabela 6 – Série de dados registrada por Gilbert White.

Year	Total (inches)	Total (mm)
1780	27.32	694
1781	30.71	780
1782	50.26	1277
1783	33.71	856
1784	38.80	986
1785	31.55	801
1786	39.57	1005

Fonte: Strangeways, 2010.

5.1.2. Pluviômetros manuais

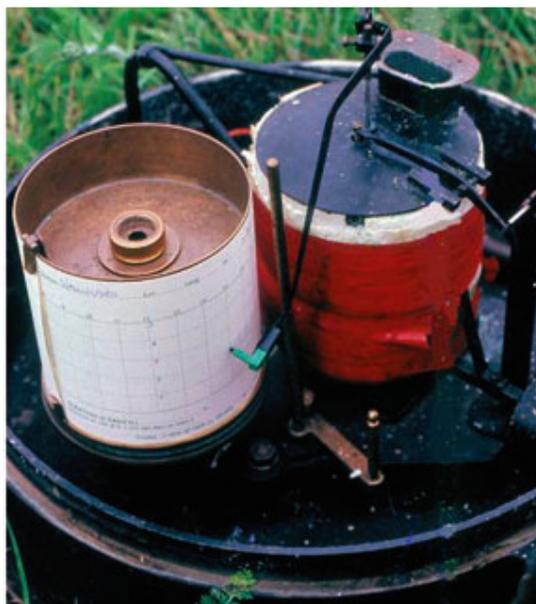
No contexto atual, Sevruk e Klem (1989) estimaram que existam aproximadamente 50 modelos de pluviômetros manuais em uso no mundo. A principal característica desses modelos é a medição da chuva total diária, impossibilitando a medida de intensidade da chuva. Assim, parâmetros importantes para avaliação de eventos de precipitação pluviais não podem ser inferidos a partir destes instrumentos. Outra característica desses equipamentos é a necessidade diária da intervenção de um operador.

5.1.3 Pluviômetros mecânicos

A necessidade de medição automática da precipitação pluvial motivou o desenvolvimento de pluviógrafos mecânicos. Estes equipamentos mecânicos usualmente, são baseados na medição do peso da água em um recipiente. Assim, o peso da água de chuva que se acumula em um recipiente é registrado. O vaso que acumula a água é suspenso em uma plataforma sustentada por mola ou braço de equilíbrio. A variação do peso da água gera uma variação em alavancas, onde está montada uma

caneta, que é movimentada, permitindo o registro automático da chuva. Osler (STRANGWAYS, 2010 apud KURTYKA, 1953), em 1837 no Reino Unido fez um dos primeiros pluviômetros mecânicos baseado no peso da água. O vaso que recebia água era esvaziado por um sifão a cada 0,25 polegadas de (aproximadamente 6 mm de lâmina) chuva. A Figura 46 ilustra o mecanismo de um pluviômetro mecânico, este instrumento fez a automação da medição da chuva, no entanto, as partes mecânicas do sistema demandam manutenção, assim, o pluviômetro elétrico foi o próximo avanço da medição de precipitação pluvial.

Figura 46 – Estrutura do pluviômetro mecânico.



Fonte: Kurtyka, 1953.

5.1.4 Pluviômetros elétricos

Os pluviômetros automáticos de balança são os tipos mais utilizados atualmente. No século XX, foram desenvolvidos vários projetos desse tipo de pluviômetro automático. Os modelos disponíveis no mercado possuem um dispositivo basculante duplo com volume específico. Cada enchimento de um dos compartimentos e movimentação da balança, conforme o tipo utilizado, é equivalente a 0,1, 0,2, 0,25, 0,5 ou 1 milímetro (STRANGWAYS, 2010).

É usado um interruptor magnético para implementar o sensor de pulso elétrico do pluviômetro. O interruptor magnético é composto de duas lâminas metálicas instaladas em paralelo, encapsuladas em uma ampola de vidro. Ao se aproximar um ímã dessa ampola, as lâminas se tocam por intermédio da força magnética do ímã, estabelecendo um contato elétrico. O ímã é instalado na báscula do sistema, a báscula muda de posição quando recebe o volume de água específico para o tipo de pluviômetro, e essa ação gera um pulso elétrico para o sistema de aquisição de dados. A Figura 47 ilustra o detalhe construtivo do pluviômetro de báscula, o recipiente prateado é o local onde é coletado a água da precipitação.

Figura 47 – Pluviômetro de báscula.



Fonte: STRANGWAYS, 2010).

5.1.5 Pluviômetros eletrônicos gravimétricos

O registro da água de precipitação pluvial é feito por intermédio do sinal de tensão elétrica, gerado por uma célula de carga com a variação do peso da água da chuva em um recipiente que faz pressão sobre a célula de carga. A operação automática

necessita do esvaziamento do recipiente que contém a água da chuva, esse esvaziamento é geralmente feito por intermédio de sifão.

5.1.6. Pluviômetros eletrônicos capacitivos

Com desenvolvimento recente, medidores de capacitância estão sendo usados para medição automática da precipitação. No recipiente cilíndrico em que a água da chuva é coletada, são inseridos eletrodos isolados que funcionam como placas de um capacitor. A água coletada e o ar são o dielétrico desse capacitor, pois a constante dielétrica da água é cerca de 80 e a do ar é 1. Conectando esse capacitor a um circuito eletrônico, pode-se medir o nível da água. Essa tecnologia não apresenta partes móveis, um exemplo de aplicação é a utilização em bóias no Oceano Pacífico e no Oceano Atlântico na faixa equatorial (STRANGWAYS, 2010).

O pluviômetro capacitivo (Figura 48) coleta e registra medidas de precipitação e ao contrário do convencional, medidor de báscula, não tem partes móveis. A medição de precipitação é feita com um transdutor capacitivo, com circuito condicionador eletrônico que produz uma tensão elétrica de saída padrão. A saída padrão é de 0 a 5 VDC. O nível de tensão elétrica 0 VDC é equivalente a 0 mm de precipitação e 50 milímetros de precipitação é equivalente a 5 VDC. O pluviômetro tem uma precisão de $\pm 1\text{mm}$ (YOUNG, 1996).

Crabit et. al (2011) desenvolveu e avaliou um pluviômetro capacitivo para caracterizar o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas. O sensor foi testado sob condições controladas em laboratório e em condições reais no campo. Comparações entre o instrumento desenvolvido e o pluviômetro de báscula, mostraram resultados com incertezas aceitáveis em hidrologia. O sistema consiste basicamente de uma sonda capacitiva inserida em um tubo com água, onde a água e o ar vão fazer o papel de dielétrico. Um circuito eletrônico faz o condicionamento do sinal para leitura em sistema de aquisição de dados

Figura 48 – Pluviômetro capacitivo comercial



Fonte: YOUNG, 1996.

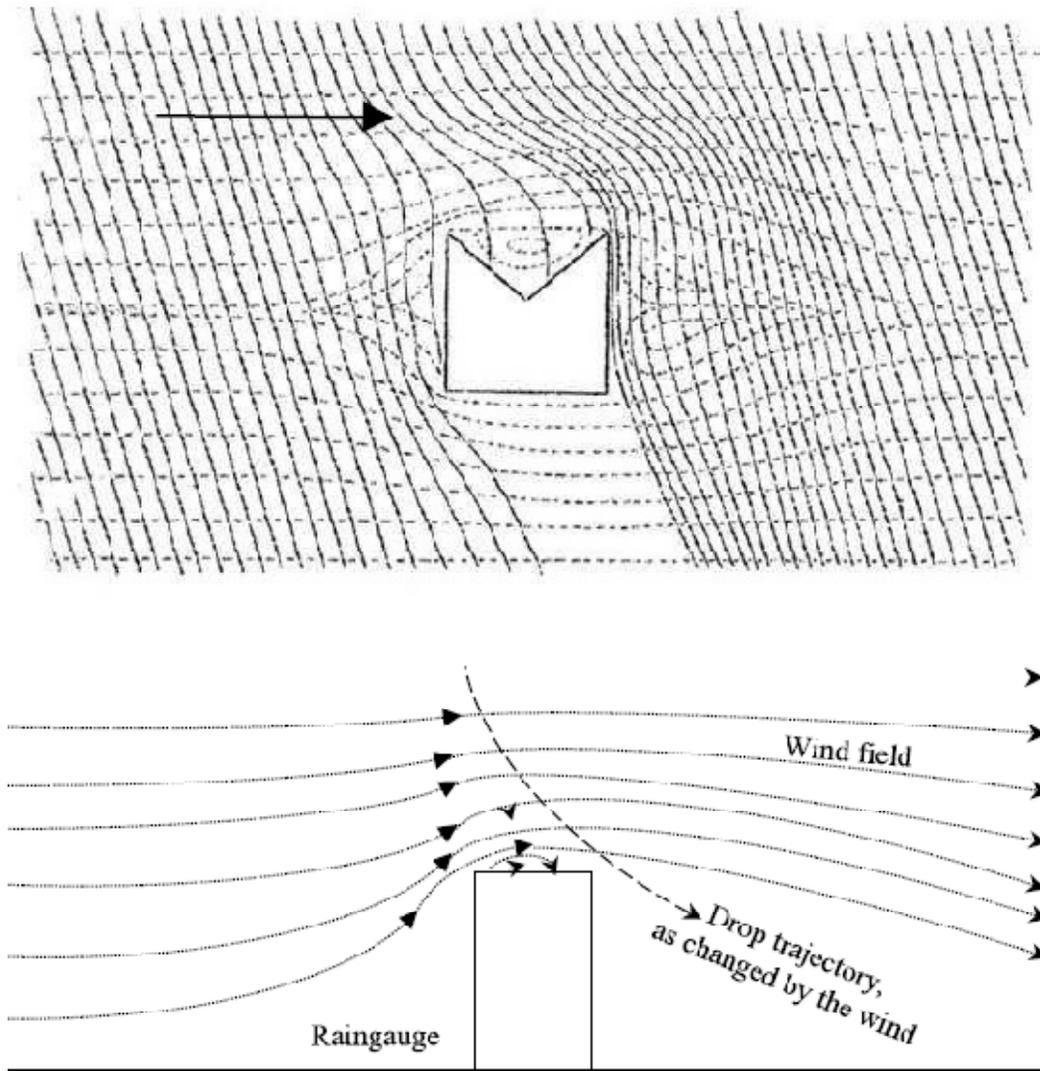
5.1.7. Erros de medição da precipitação pluvial dos pluviômetros

Uma fonte de erro na medição dos pluviômetros é o diâmetro do funil de captação da água. Esse erro depende da tecnologia do modelo de pluviômetro adotado. Por exemplo, em pluviômetros mecânicos automáticos, é necessário um diâmetro da boca do recipiente de captação grande, para gerar um peso mínimo necessário para o acionamento inicial do mecanismo de registro. Em pluviômetros de balança com

pequeno diâmetro da boca do vaso de captação, são observados grandes erros de medida da precipitação pluvial. A perda de água por evaporação, pode gerar erro em torno de 0,2 mm de lâmina para, um pluviômetro com diâmetro do funil de captação em torno de 5 polegadas. Nesse caso, o erro da medição depende do diâmetro de captação, pelo fato da evaporação ocorrer com gotas d'água que não escoam pelo funil, assim, quanto maior o diâmetro do funil, mais gotas ficam retidas na superfície de captação. Eventos intermitentes, também podem representar um aumento nessa fonte de erro, pois a pausa entre os eventos ocasiona a evaporação de gotas retidas na superfície. O salpico de água devido à queda de grandes gotas de água é outra fonte de erro, mas a combinação de altura e do ângulo de inclinação do funil de captação pode eliminar qualquer erro dessa fonte. Erro de nivelamento na instalação de pluviômetros pode causar erros consideráveis na medição. Um erro de 1% na medida é ocasionado por um desnivelamento de 1° (STRANGWAYS, 2010 apud KURTYKA, 1953). Observando os pluviômetros instalados em campo, raramente se encontra um instrumento nivelado corretamente. O local da instalação dos pluviômetros também pode ocasionar erros, caso as regras específicas de instalação não forem seguidas. Objetos, construções e outros obstáculos têm que estar a uma distância mínima específica, para não gerarem interferência na chuva medida, pois quando a chuva cai obliquamente, os obstáculos próximos podem interromper a trajetória das gotas de chuva. Quando é necessária a instalação em florestas, uma opção para evitar a interferência das árvores, é procurar clareiras, para realizar a instalação dos equipamentos (GARCEZ & ALVAREZ, 1988).

O erro de medição pluviométrica por intermédio do vento é o que causa mais incerteza na medição e o mais difícil de ser sanado. Na região semiárida brasileira, deve-se ter uma atenção especial para esse erro, pois nessa região o regime de ventos é alto. A Figura 49 ilustra o comportamento de gotas de chuvas quando o vento encontra obstáculos, essa interferência aumenta com o aumento da velocidade do vento sobre o corpo dos pluviômetros. O tamanho das gotas de chuva é outro parâmetro que contribui para erros de medição em decorrência da ação eólica (STRANGWAYS, 2010 apud JEVONS, 1861). A perturbação nas linhas de corrente de vento e, em consequência, na trajetória de queda das gotas de chuva acontece no plano vertical e no plano horizontal, ou seja, as gotas de chuva se desviam lateralmente e outras verticalmente da boca do pluviômetro. Esse desvio é função da velocidade do vento e do tamanho das gotas de chuva (QUIJANO, 1922).

Figura 49 – Interferência do vento sobre trajetória da gota de chuva.



Fonte: Jevons, 1861.

5.1.8. Densidade de postos pluviométricos

De acordo com Araujo (2008), o uso de um posto pluviométrico para uma área de 12 km² ou dois postos é igualmente insatisfatório, sendo observadas diferenças de até 126% de vazão modelada no valor calculado com o uso de três estações para uma área de 12 km². Os erros verificados na estimativa do fluxo da água com o uso de uma única ou de duas estações refletem-se em incerteza também na estimativa da disponibilidade

do recurso hídrico. Com base nesses resultados recomenda-se a utilização de um posto pluviométrico a cada quatro km² – ou mais densa para bacias experimentais no semi-árido. Assim, buscar o desenvolvimento de instrumentos e a metodologia de calibração de pluviógrafo são relevantes para o estudo detalhado das microbacias.

5.2. Metodologia de desenvolvimento de pluviômetros para as microbacias experimentais

5.2.1. Pluviômetro de balança

Inicialmente o pluviógrafo desenvolvido para o campo experimental de microbacias foi do tipo balança, e utiliza como sensor um interruptor magnético (*Reed Switch*), que é acionado através de um ímã instalado na balança do pluviômetro, o pulso produzido no acionamento do interruptor promove um incremento no contador do microcontrolador, sendo que o pulso é equivalente a um índice pluviométrico em mm posteriormente totalizados para avaliação da precipitação pluviométrica. O pluviômetro desenvolvido e calibrado no LEMA é mostrado na Figura 50.

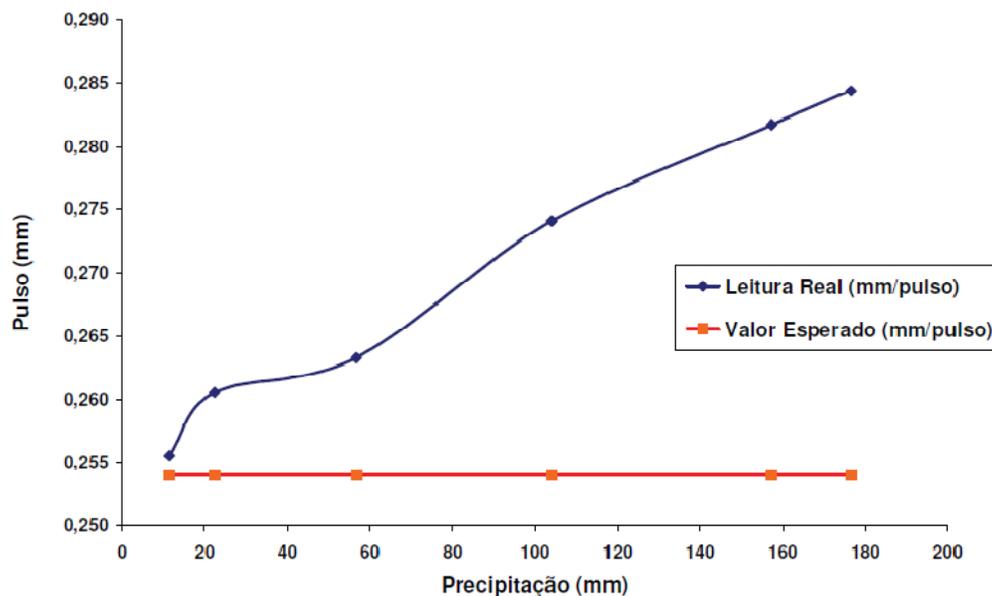
Figura 50 - Detalhe da balança do Pluviômetro desenvolvido.



Fonte: Alves, 2008.

Segundo Braga et al. (2006), a melhor compreensão dos erros inerentes ao processo de medição dos pluviômetros de balança passa pelo desenvolvimento de uma plataforma de teste capaz de simular precipitação de maneira confiável e facilmente reproduzível. O uso dessa plataforma neste equipamento mostra a divergência entre o valor esperado e o medido (Figura 51).

Figura 51 - Resultados de testes efetuados com o pluviômetro de balança comercial.



Fonte: Braga et al., 2006.

Conforme Braga et al. (2006), os resultados dos testes efetuados enfatizam que existe a necessidade de se observar, com mais cuidado, o real desempenho dos pluviômetros de balança. O mecanismo pelo qual os erros ocorrem, se amplificam em momentos de elevada intensidade de precipitação e se inserem em processos de medição média. Esses eventos pluviométricos são comuns no Brasil e especialmente no semiárido.

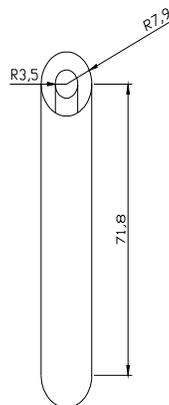
A falta de manutenção preventiva em pluviômetros de balança pode ser fonte de erros importantes por causa de suas características construtivas. Esse pluviômetro é dotado de mecanismos móveis, sendo um erro comum, a descalibração, por conta de resíduos ocasionadas pelas intempéries. Outra componente importante para a causa de erro é a balança, pois esse mecanismo é uma espécie de balança que tem que estar bem

nivelada. O nivelamento de qualquer pluviômetro é essencial para o funcionamento preciso do equipamento. No de báscula, esse fator tem influência na captação da água e no funcionamento da báscula do sistema. Há também o entupimento do sistema por folhas ou diversos materiais levados pelo vento. É conveniente, salientar nesse caso, características peculiares da caatinga e do nordeste brasileiro. No bioma caatinga, suas árvores perdem todas as suas folhas, ao passo, que a região geralmente tem regime de ventos abundantes, predispondo ao depósito de folhas na área de captação do pluviógrafo. Assim, buscar o desenvolvimento de um equipamento, sem partes móveis e mais adequadas às características da região motivou o desenvolvimento do pluviômetro capacitivo.

5.2.1. Desenvolvimento do pluviômetro capacitivo

Baseado nas premissas anteriormente citadas, outro pluviógrafo baseado na teoria do capacitor de placas concêntricas foi desenvolvido e testado. O objetivo com a adoção desse nova tecnologia é aumentar a precisão na medida do índice pluviométrico. O sensor capacitivo utilizado mede o volume aproximado de um pluviômetro tipo Ville de Paris. Este equipamento é composto de dois cilindros concêntricos de alumínio (Figura 52), devidamente isolados para formar a configuração do capacitor concêntrico, um funil coletor da chuva e um sistema de drenagem automático da água.

Figura 52 – Disposição das placas condutoras cilíndricas do pluviógrafo.



Fonte: Autor.

5.2.3. Cálculo da capacitância do pluviógrafo

Em um capacitor cilíndrico, suas placas são cilindros metálicos coaxiais. No vácuo, a equação é dada por:

$$C = 2\pi\epsilon_0 * L / \ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \quad (7)$$

Onde,

R1 é o raio do cilindro menor (m);

R2 é o raio do cilindro maior (m);

L é o comprimento dos cilindros (m);

ϵ_0 é a permissividade do vácuo (F/m).

A capacitância entre dois cilindros coaxiais metálicos com raios R₁ (m) e R₂ (m) e comprimento L (m), com o espaço do dielétrico preenchido de ar é dado por:

$$C = 2\pi\epsilon_0 * K_{ar} * L / \ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \quad (8)$$

Onde,

K_{ar} é permissividade relativa do ar (F/m).

Pode-se escrever também que a capacitância entre dois cilindros coaxiais metálicos, com raios R₁ e R₂, e comprimento L onde o espaço do dielétrico está totalmente preenchido com água é dada por:

$$C = 2\pi\epsilon_0 * K_{água} * L / \ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \quad (9)$$

Onde,

K_{água} é permissividade relativa da água (F/m).

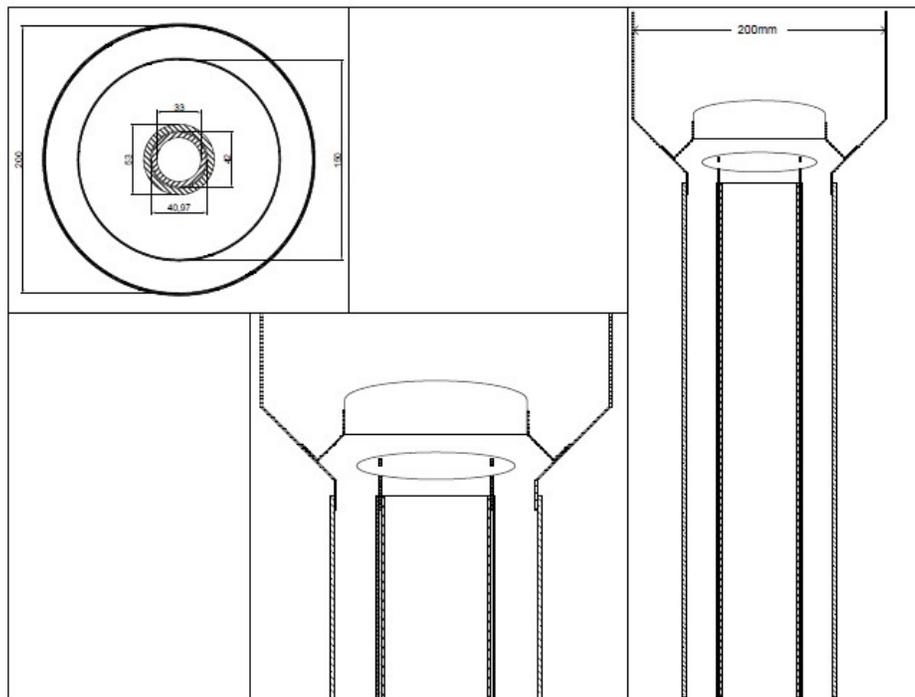
Caso, o capacitor cilíndrico tenha o espaço do dielétrico preenchido com material com características dielétricas diferentes como a água e o ar. A capacitância entre os dois cilindros metálicos é dada pela seguinte equação:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} \left\{ (L - L_{ag})K_{ar} + (L - L_{ar})K_{ag} \right\} \quad (10)$$

Em que, L = Comprimento total do cilindro (m), L_{ag} = Parcela do comprimento total ocupada com água (m), L_{ar} = Parcela do comprimento total ocupada com ar (m).

Os pluviômetros capacitivos comerciais e experimentais usam sondas capacitivas inseridas na água, necessitando de circuitos eletrônicos de leitura da capacitância com alta sofisticação. A arquitetura de montagem das placas do capacitor neste trabalho é inovadora, pela razão de permitir a adoção de um circuito eletrônico com menos componentes. O circuito eletrônico fica mais robusto e com alta precisão e baixo custo. Toda água coletada pelo pluviômetro fica entre as placas concêntricas do capacitor, como mostra a disposição do funil de recipiente que coleta a água na Figura 53, isto é, a água é na realidade parte do dielétrico do capacitor. As outras componentes desse capacitor são o ar e o tubo isolante desse capacitor sonda.

Figura 53 – Desenho do projeto do pluviômetro com o recipiente de captação e placa de circuito impresso



Fonte: Autor.

5.3. Resultados

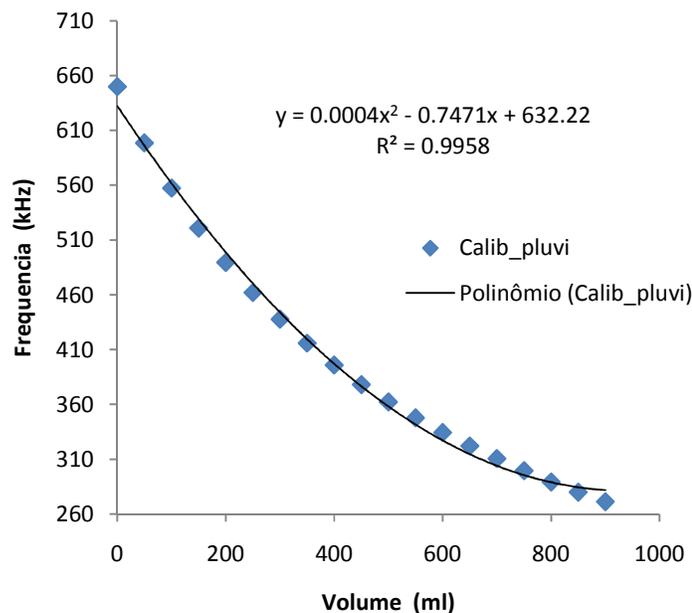
5.3.1. Calibração do pluviômetro capacitivo

A calibração do pluviômetro capacitivo de precisão foi efetuada por intermédio de uma bureta de 50 ml. Foi adicionado o volume total de 900 ml com passos de 50 ml com a bureta. Foram feitas quatro repetições desse procedimento. O sinal de saída do pluviômetro capacitivo é obtido em frequência e a média das quatro repetições gerou a equação de calibração do pluviômetro:

$$F_{sc} = 0,0004V^2 - 0,7471V + 632,22 \quad (12)$$

Onde F_{sc} é o sinal de saída do sensor em frequência (kHz) e V é o volume de água no pluviômetro. A equação é do tipo quadrática, portanto não linear, com coeficiente de determinação R^2 de 0,9958, e *off set* de 632,22 kHz, quando a PPT = 0. A Figura 54 ilustra o gráfico e a reta de calibração do sensor capacitivo.

Figura 54 – Calibração do sensor capacitivo.



Fonte: Autor

5.3.2. Validação do Instrumento em Condição de Precipitação Artificial de Alta Intensidade

Com o objetivo de avaliar a calibração e funcionamento do instrumento, livre de erros sistemáticos das condições de campo, a exemplo da variação eólica, foi montada uma estrutura de chuva artificial, gerada por um aspersor de irrigação, no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará. Além da estrutura de teste estar montada dentro do laboratório, os pluviômetros estavam localizados abaixo do nível do solo, assim, a interferência do vento foi a mínima possível. A precipitação foi gerada por um aspersor, a uma pressão constante, em todos os ensaios, com vários tempos de precipitação, a uma intensidade de precipitação de 56,4 mm/h. A foto da Figura 55 mostra a disposição dos pluviômetros, o pluviômetro em teste está localizado entre equipamentos similares padrões, tipo Ville de Paris.

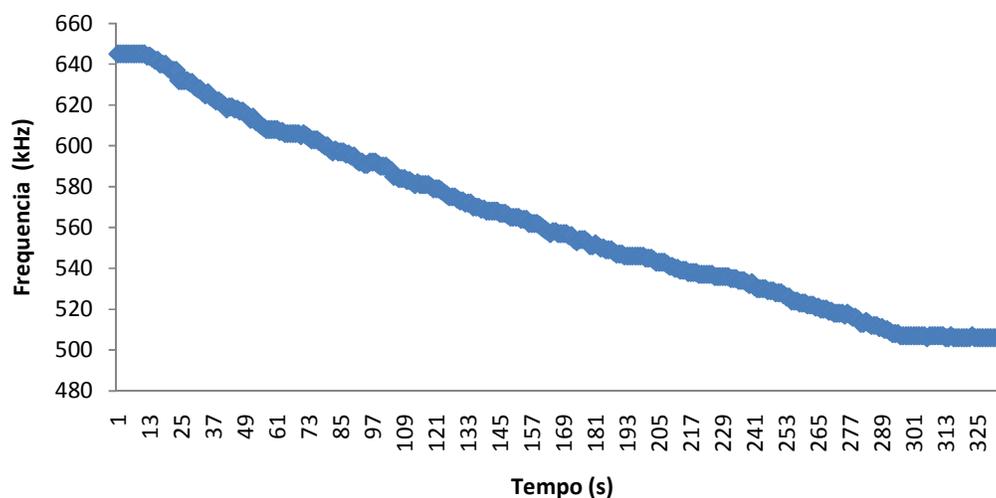
Figura 55 – Disposição dos instrumentos no laboratório



Fonte: Autor.

A Figura 56 ilustra a evolução dos valores registrados de frequência do pluviômetro capacitivo em teste, por um tempo de aquisição de dados de segundo em segundo. O pluviômetro manual, mais próximo do aspersor, com um tempo de precipitação de 5 minutos, mediu 4,1 mm de lâmina e o instrumento mais distante mediu 4,6 mm, por conseguinte, a média obtida da medida de precipitação pluvial dos pluviômetros comerciais foi de 4,35 mm de altura pluviométrica e o valor da medição do pluviógrafo automático capacitivo foi de 4,49 mm, para um tempo de precipitação de 5 minutos. A medição da lâmina pelos pluviômetros para um tempo de precipitação de 10 minutos, foi de 9,3 mm, 9,4 mm (pluviômetro capacitivo) e 9,4 mm respectivamente. É interessante observar o momento do início e término do evento, caracterizado pela coleta de valores constantes do sinal de frequência de saída do sensor. Observando o gráfico, o momento do início do evento evidencia uma frequência constante na ordem de 640 kHz, o final do evento é caracterizado por uma frequência constante de 500 kHz.

Figura 56 – Resposta dinâmica do pluviômetro automático capacitivo à precipitação pluvial com intensidade de 56,4 mm/h por 5 minutos

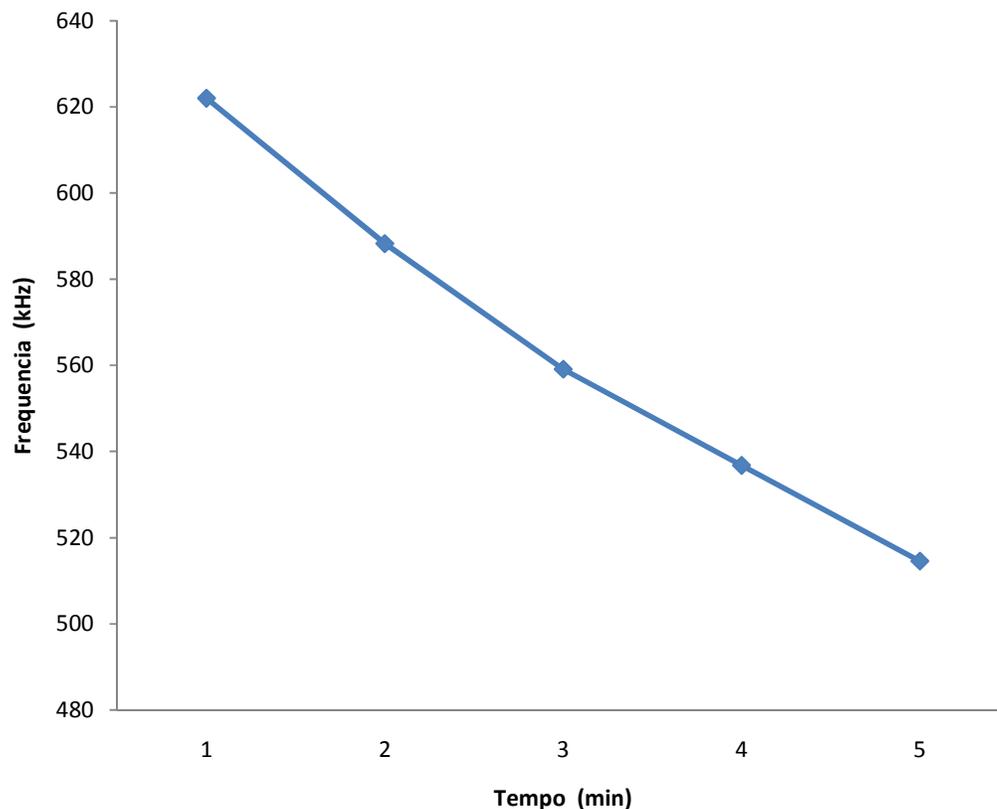


Fonte: Autor

A densidade elevada de dados devido à alta frequência de coleta e armazenamento tem seus benefícios, não obstante, sujeitar-se à interferências. Pode-se fazer um tratamento estatístico, por intermédio de programação específica, para

melhorar a visualização dos dados e até mesmo a análise de outros parâmetros. Foi desenvolvido um programa baseado em média móvel para esse fim, a sua aplicação nos dados gerou o gráfico da Figura 57. Assim, pode-se observar a evolução do monitoramento da precipitação pluvial, minimizando os ruídos.

Figura 57 – Monitoramento de precipitação pluvial, com intensidade de 56,4 mm/h, por 5 minutos, em pluviômetro automático capacitivo, com média dos dados de 1em 1 minuto

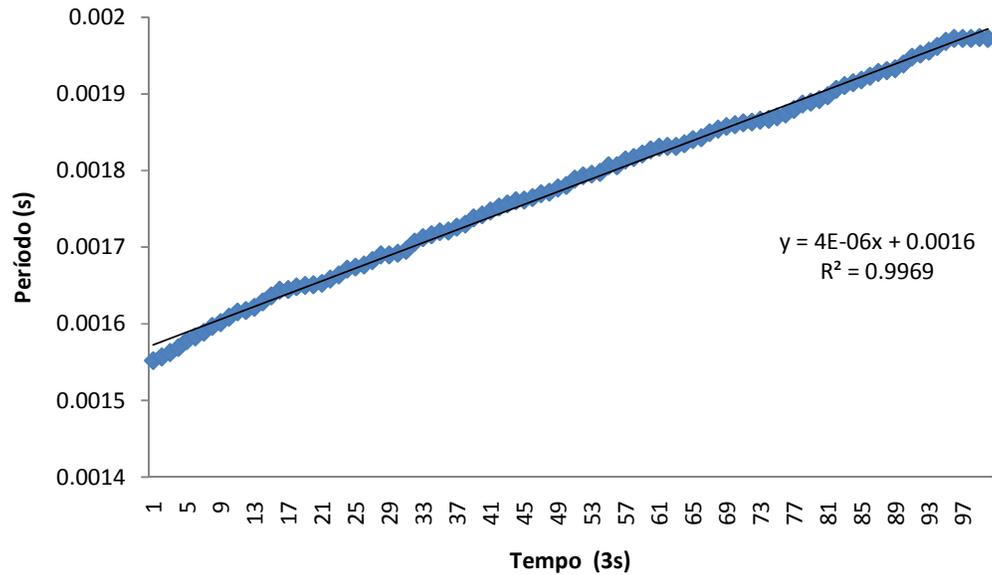


Fonte: Autor.

A visualização da evolução do monitoramento da precipitação pluvial pode ser melhor observada, pela inversão dos dados da frequência, porque o valor do sinal de frequência é inversamente proporcional ao valor da chuva medida. A Figura 58 ilustra a inversão do sinal, assim pode-se observar, de forma, convergente o monitoramento da precipitação pluvial. Na Figura 59, observa-se o gráfico com os dados tratados por um

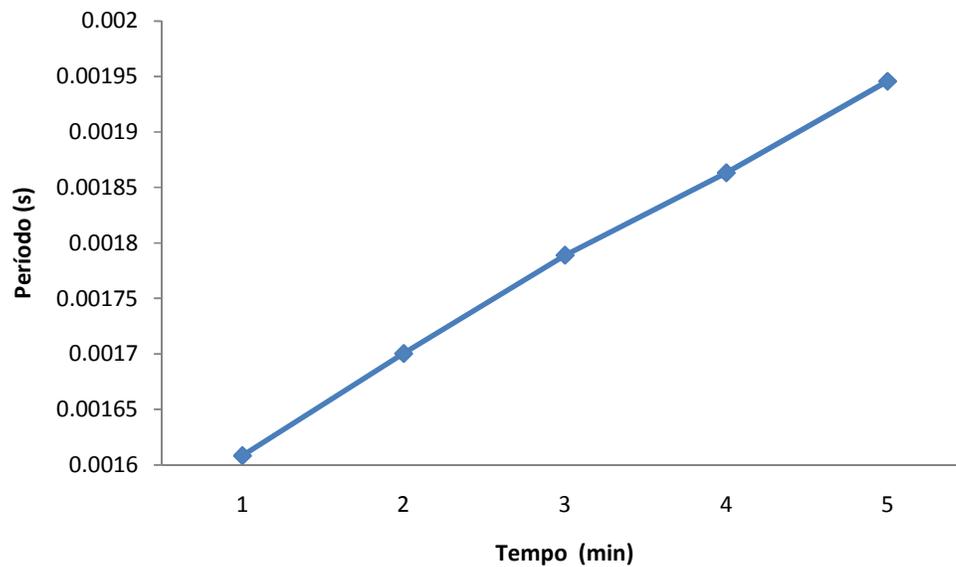
programa desenvolvido para melhorar a apresentação dos mesmos. O *software* foi elaborado na plataforma MATLAB.

Figura 58 – Amostragem do monitoramento de precipitação pluvial com o inverso do sinal de frequência do pluviômetro capacitivo.



Fonte: Autor

Figura 59 – Tratamento com programa específico para melhor visualização dos dados monitorados.

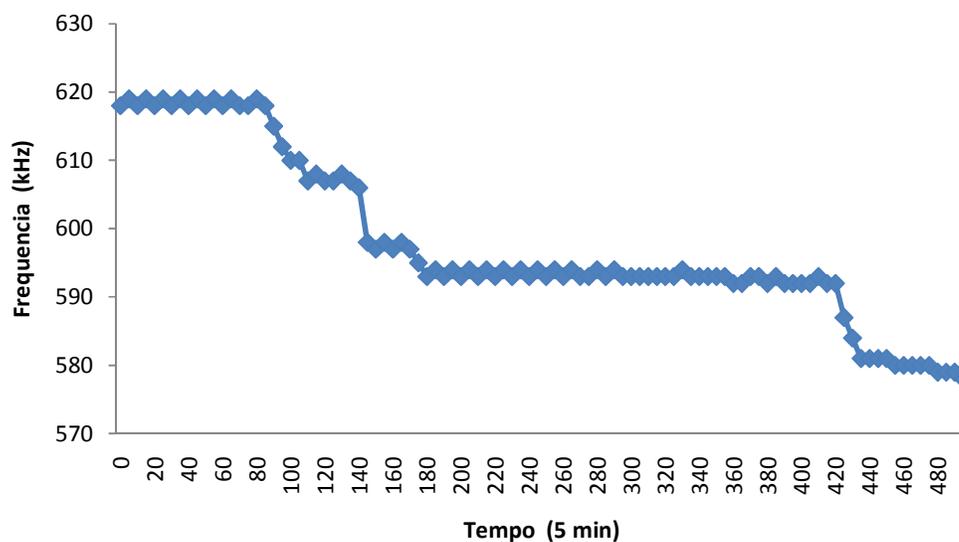


Fonte: Autor

5.3.3. Validação do instrumento em condição de precipitação natural de baixa intensidade.

Uma particularidade importante do fenômeno da precipitação pluvial de grande interesse em hidrologia é a intensidade da precipitação. A velocidade de precipitação $i=h/t$ é medida em geral em mm/min ou mm/h. Pode ser medida também em litros/segundo/hectare. Com o objetivo de observar o desempenho do pluviômetro automático capacitivo em precipitações com pequenas intensidades, instalou-se o instrumento na área experimental de campo no Laboratório de Hidráulica e Irrigação. Na mesma área, dois pluviômetros manuais foram montados, com uma distância de aproximadamente 1 m do pluviômetro automático. O instrumento registrou o evento do dia 22 de julho de 2013, no município de Fortaleza-CE. A Figura 60 ilustra o registro dessa precipitação pluvial. A primeira observação é a composição desse evento em três pequenos eventos (evento1, evento2 e evento3). O evento total tem pequena magnitude, por conseguinte, os pequenos eventos que fizeram a composição do evento total apresentam lâminas precipitadas no tempo e intensidade ainda menores, entretanto, o pluviômetro automático capacitivo foi capaz de medir os parâmetros da ocorrência.

Figura 60 – Precipitação pluvial de 1,4 mm medida pelo pluviômetro capacitivo, em 22 julho de 2013, no município de Fortaleza-CE.



Fonte: Autor.

A Tabela 7, apesar do evento ser de pequena magnitude, ilustra a resolução do instrumento para medição de pequenos eventos e a informação da intensidade pluviométrica. A resolução desse instrumento para altura de lâmina de chuva, depende da configuração do SAD, nesse caso, o instrumento tem uma resolução de 0,013 mm. O registro da velocidade da chuva tem importância fundamental, em fenômenos de escoamento superficial e processos erosivos, nas microbacias do semiárido. A inclinação das curvas observadas na Figura 60 podem ser correlacionadas com valores de i da Tabela 7. A Tabela 7 apresenta os valores de intensidade de PPT para os três eventos de chuva registrados no dia 22/07/2013, onde observa-se que o pluviômetro capacitivo foi capaz de registrar valores de i na ordem de 0,2 mm/h.

Tabela 7 – Dados de análise de parâmetros da chuva de, 22 julho de 2013, no município de Fortaleza-CE.

Evento	TIE (H:min)	TFE (H:min)	TT (min)	AC (mm)	I (mm/h)
1	2:09	2:29	20 min	0,7 mm	2,2 mm/h
2	3:09	3:14	5 min	0,297 mm	3,578 mm/h
3	7:49	8:04	15 min	0,371 mm	0,22 mm/h

TIE – Tempo do início do evento registrado no SAD.

TFE – Tempo do final do evento registrado no SAD.

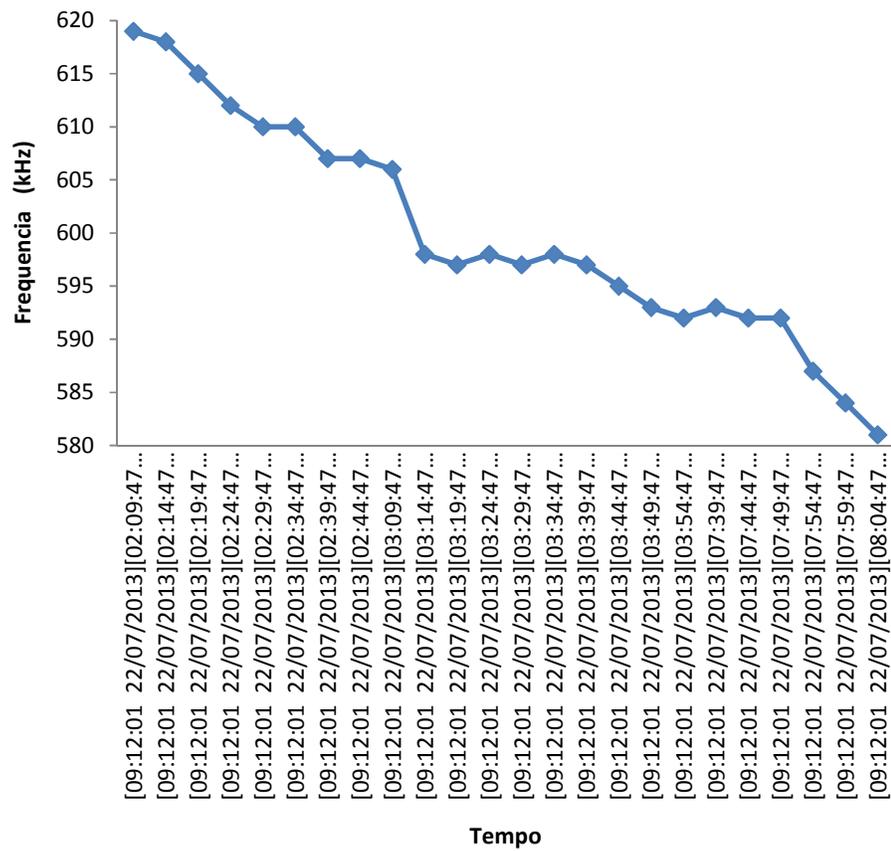
TT – Tempo total do evento.

AC – Altura da lâmina de chuva.

Fonte: Autor.

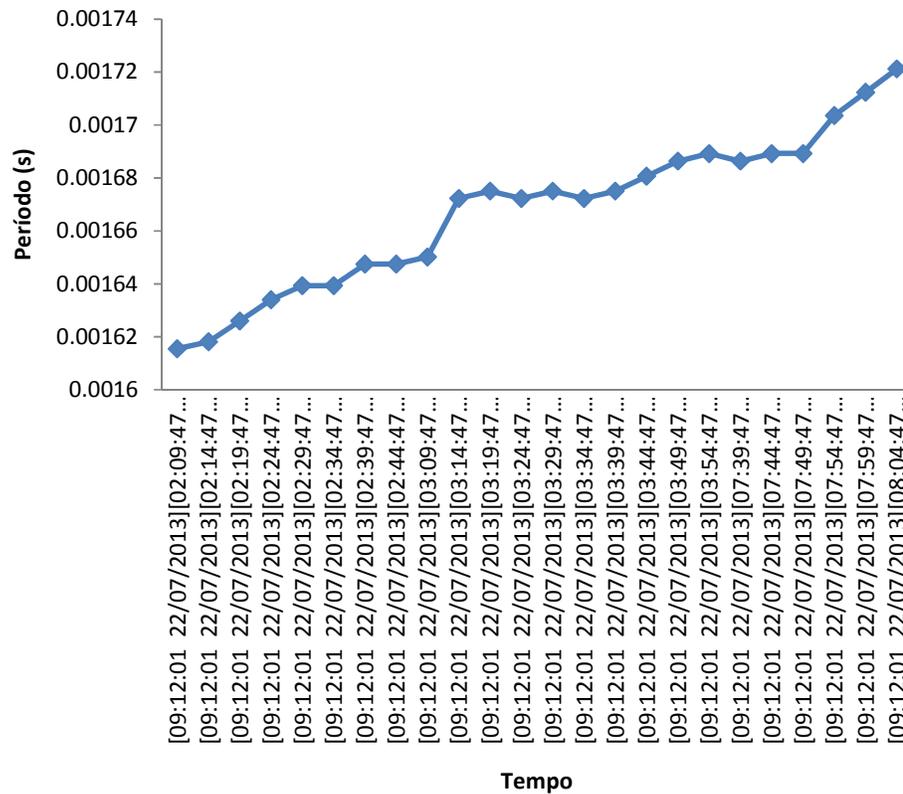
Tratando-se os dados de frequência utilizando planilha eletrônica, pode-se observar os dados da Figura 61a e 62b, respectivamente, para frequência e período. A Figura 60b, com a inversão, permite uma visualização proporcional da inclinação da curva, para as três intensidades de precipitação pluvial calculadas no evento de chuva de 22 julho.

Figura 61a – Gráfico dos dados de chuva com tratamento de planilha eletrônica.



Fonte: Autor.

Figura 61b – Gráfico da evolução do monitoramento de precipitação pluvial com os inversos dos dados de saída.

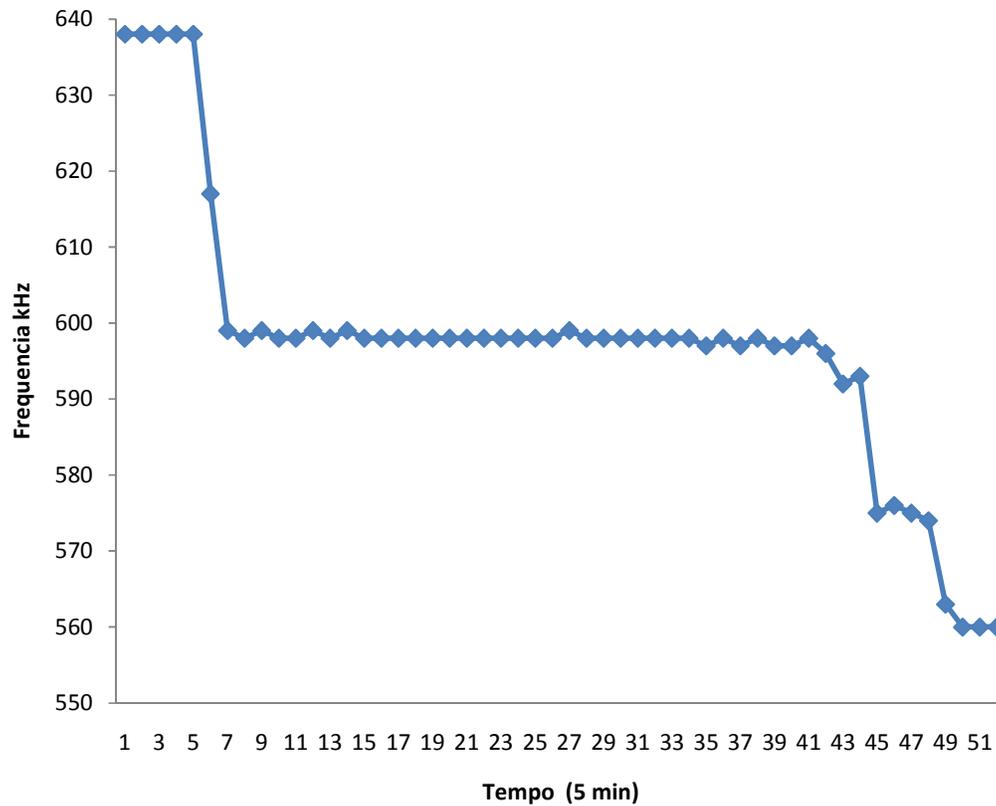


Fonte: Autor.

5.3.4. Intercomparação entre medição dos pluviômetros manuais com pluviômetro capacitivo por intermédio do método gravimétrico

O peso da água de precipitação pluvial tem uma relação direta com a altura da sua lâmina, assim, por intermédio dos dados que geraram o gráfico da Figura 62 e a medida do peso dessa água, coletada pelos pluviômetros manuais instalados no campo, pode-se comparar as medições desses pluviômetros com o pluviômetro capacitivo automático.

Figura 62 – Registro de chuva de 2,49 mm, medida pelo pluviômetro capacitivo, em 26 de julho de 2013, no município de Fortaleza-CE



Fonte: Autor.

A Tabela 8 ilustra a comparação do monitoramento de pluviômetros manuais (A e B), com pluviômetro capacitivo automático, de uma chuva com lâmina de 2,4 mm. A divergência entre os valores medidos pelos pluviômetros manuais e o pluviômetro capacitivo automático é devida à evaporação da água, pois o pluviômetro automático capacitivo registra a medição em tempo real, e as coletas dos dados nos pluviômetros manuais foram feitas algumas horas depois do evento.

Tabela 8 – Dados de medição do peso da água de precipitação pluvial em campo.

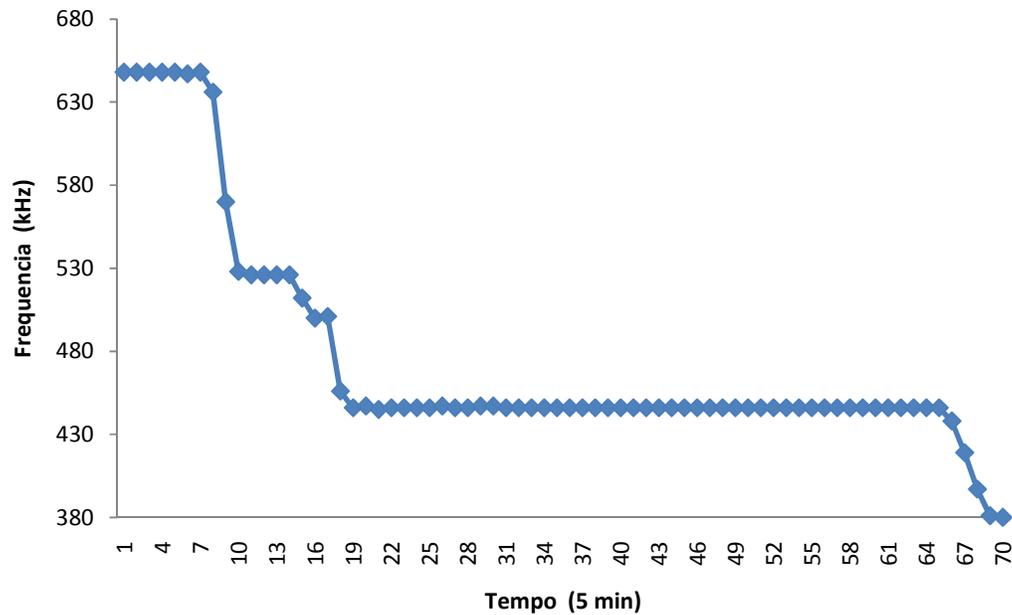
Pluviômetro	Massa da água	h
A	91,70 g	2,27 mm
B	88,55 g	2,20 mm
Automático capacitivo	-	2,49 mm

Fonte: Autor.

5.3.5. Investigação da convergência da medição do pluviômetro capacitivo com pluviômetro manual e posto de medição automática do serviço meteorológico local

Com o objetivo de observar e avaliar o desempenho do instrumento em campo, foi feita a intercomparação entre a medição de dois pluviômetros manuais, posto da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e o equipamento em desenvolvimento. O evento analisado é do dia 27 de julho de 2013, e a Figura 63 ilustra a evolução do monitoramento. Utilizando a curva de calibração do instrumento, obteve-se uma altura de lâmina precipitada de 10,87 mm. As lâminas observadas nos instrumentos manuais foram de 10 mm e 10,3 mm. Os instrumentos apresentam uma boa convergência nos valores medidos, o pequeno erro deve-se a evaporação da água nos instrumentos. A tabela 9 apresenta o valor da precipitação pluvial em Fortaleza-CE. O valor medido pelo posto da FUNCEME é de 10 mm, convergindo para as medidas realizadas pelos pluviômetros.

Figura 63 – Evento de precipitação pluvial com lâmina de 10,87 mm medida pelo pluviômetro automático capacitivo.



Fonte: Autor.

Tabela 9 – Medição pluvial de postos da FUNCEME, em 27 de julho de 2013.

POSTO	MUNICIPIO	QTD(mm)
Pacatuba	Pacatuba	25.0
Itaitinga	Itaitinga	25.0
Maranguape	Maranguape	20.2
Tanques	Maranguape	12.0
Berra Bode-Ets	Aquiraz	10.4
Fund.Ma.Nilva(Agua Fria)	Fortaleza	10.0
Itapebussu	Maranguape	9.0
Eusebio	Eusebio	7.0
Museu Rodolfo Teofilo	Maracanau	5.3

Fonte: FUNCEME, 2013.

5.3.6. Avaliação de custo do pluviógrafo capacitivo

Uma das premissas para se realizar o estudo detalhado de uma microbacia é a necessidade de uma rede de medição, com pluviômetros automáticos, com alta densidade. Assim, esses equipamentos devem ter baixo custo e disponibilidade de aquisição. Os instrumentos encontrados no mercado são importados e com um custo em torno de R\$ 4.000,00. O pluviômetro capacitivo automático é feito com material encontrado no comércio local e o custo do material para sua fabricação é de R \$ 58,76. A Tabela 10 ilustra o tipo de material utilizado e o valor desses insumos.

Tabela 10 – Custo do material utilizado na montagem do pluviômetro capacitivo.

Descrição do material	Quant.	Unid.	V. Unit. (R\$)	V. total (R\$)
Circuito integrado 01	01	peça	0,93	0,93
Circuito integrado 02	01	peça	2,55	2,55
Placa de circuito impresso	01	peça	4,00	4,00
Resistor de 1/8 W	03	peça	0,01	0,03
Tripot de precisão	01	peça	2,00	2,00
Capacitor cerâmico 10 nF	02	peça	0,04	0,08
Cabo 3 x 24 AWG	04	m	1,50	6,00
Tubo de PVC 1 1/2'	01	m	3,00	3,00
Kap de PVC 1 1/2'	01	PC	2,00	2,00
Tubo de alumínio 1'	01	m	4,50	4,50
Tubo de alumínio 3'	01	m	22,67	22,67
Fibra de vidro	0,5	Kg	2,00	1,00
Resina de laminação	1,0	L	10,00	10,00
Total				58,76

Fonte: Autor

5.3.7. Exemplo de intempérie ambiental atuante no sistema

Embora o instrumento desenvolvido no presente trabalho seja automático, ele não está livre de manutenção preventiva por causa das intempéries ambientais. A Figura

64 ilustra este problema, quando somente, após dois dias da instalação do equipamento, em campo, houve a necessidade de manutenção, em decorrência da sujeira provocada por pássaros, que tem com habitat, a área experimental. A Figura 65 mostra a água coletada dos pluviômetros em teste, poluídas por dejetos dos pássaros.

Figura 64 – Intempéries ambientais.



Fonte: Autor.

Figura 65 – Água de pluviômetros poluídas por dejetos de pássaros.



Fonte: Autor.

5.4. Conclusão

O monitoramento da precipitação pluvial, pelo pluviômetro capacitivo automático, desenvolvido no presente trabalho, permitiu medir diversos parâmetros da precipitação pluvial com precisão e resolução necessárias ao estudo de microbacias em regiões semiáridas. O instrumento tem uma resolução de 0,013 mm e registrou intensidade de precipitação na ordem 0,2 mm/h.

O custo e a disponibilidade do instrumento possibilitam a densificação de redes pluviográficas, necessárias à medição de parâmetros importantes no estudo e gerenciamento dos recursos hídricos de microbacias do semiárido brasileiro. A estimativa de custo de um pluviômetro, sem o SAD gira, em torno de R\$ 4.000,00, por outro lado, o custo do material para a montagem do pluviômetro capacitivo desenvolvido no presente trabalho é de R 58,76.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusões

Um fator importante, que coloca o monitoramento ambiental como necessidade, são as incertezas epistêmicas por conta da escassez de dados das variáveis do sistema hidrológico do semiárido. Este é um dos problemas enfrentados por gestores e pesquisadores dos recursos hídricos dessa região. Por conseguinte, o uso de tecnologia acessível desenvolvidas na região para medir parâmetros das variáveis hidrológicas em grande densidade de postos, pode diminuir consideravelmente o nível de incertezas.

O monitoramento da precipitação pluvial, pelo pluviômetro capacitivo automático, desenvolvido no presente trabalho, permitiu medir diversos parâmetros da precipitação pluvial com precisão e resolução necessárias ao estudo de microbacias em regiões semiáridas. O instrumento tem uma resolução de 0,013 mm e registrou intensidade de precipitação na ordem 0,2 mm/h.

Contemporaneamente, com as diversas arquiteturas de microcontroladores existentes, é possível conceber algoritmos que proporcionem uma utilização dos recursos de entrada analógica, saída analógica, entrada/saída digital, contadores, sincronização e requisitos de *software* e *hardware* para realizar a aquisição de dados, com alto grau de confiabilidade. É possível, com estes dispositivos, realizar projetos de custo reduzido, produzindo com tecnologia acessível, sistemas embarcados aplicados no monitoramento e controle das variáveis agrometeorológicas

O desenvolvimento de tecnologia aplicada com microcontroladores, para sistemas de aquisição de dados, em monitoramento e armazenamento de dados, com baixo custo, aumenta a disponibilidade de instrumentos e faz o desenvolvimento e o aperfeiçoamento metodológico de ensaios de laboratório.

O aprender fazendo é uma metodologia necessária ao desenvolvimento dos instrumentos automáticos aplicados no estudo das bacias hidrográficas do semiárido, devido à similaridade, diversidade espacial e temporal do sistema ambiental da caatinga.

Os sensores industriais com grande demanda de aplicação e baixo custo podem ser utilizados em aplicações de monitoramento ambiental. A convergência das variáveis ambientais medidas, com as esperadas, pode ser melhorada pelo tratamento dos dados com algoritmos, processados em microcontroladores, microprocessadores e computadores.

Os sensores de vazão para rios de primeira ordem, sensores em dutos fechados e sensores de pequena vazão são encontrados com grande diversidade no comércio. Todavia, sensores que medem o escoamento superficial, para média vazão, em canais abertos, não são encontrados comercialmente. Portanto, desenvolver a tecnologia acessível, para esses sensores, viabiliza o estudo detalhado de comportamento hidrológico de microbacias.

A literatura corrente ilustra diversos hidrogramas construídos, a partir de estimativas, com modelos, sendo escassos hidrogramas feitos a partir de dados medidos no semiárido. Os primeiros anos de coleta de dados do sistema (sensores e SAD) já possibilitaram a coleta de dados e construção de hidrogramas com os dados medidos para pequenas microbacias do semiárido. Assim, a estratégia de monitoramento de variáveis do escoamento superficial, em microbacias do semiárido, com inovação de sensores eletrônicos acessíveis e armazenamento de dados automáticos, com base em microcontrolador, se mostrou eficiente na coleta e armazenamento de dados. O monitoramento, da vazão do curso de água e da precipitação na bacia experimental, por intermédio dos sensores desenvolvidos, possibilitou o estabelecimento do tempo de concentração da bacia (5 minutos) para eventos específicos.

O desenvolvimento do sensor de custo acessível possibilitou a instalação de uma densidade alta de pontos de medição na microbacia, o que diminui a incerteza epistêmica do estudo. Assim, a análise e a tomada de decisão em relação ao manejo adequado de utilização das bacias por pesquisadores e gestores é facilitada. A estimativa de custo de um pluviômetro sem o SAD gira em torno de R\$ 4.000,00, por outro lado, o custo do material para a montagem do pluviômetro capacitivo desenvolvido no presente trabalho é de R 58,76.

No semiárido, a disponibilidade de energia solar renovável garante o suprimento energético, para sistemas com sensores ambientais, em regiões de difícil acesso, e em áreas agrícolas com irrigação automática.

6.2. Recomendações

É necessário desenvolver mais vias de conectividade do sistema, em particular, o monitoramento em tempo real com a internet, para se fazer uma melhor avaliação e manutenção do sistema proposto, evitando lacunas extensas de dados.

Dotação da plataforma de coleta de dados de monitoramento em tempo real, das variáveis medidas por meio da Internet, com desenvolvimento de sistema de comunicação por rádio e também por intermédio de celular.

Instalação da estação e sensores no Campus do Pici da UFC, em Fortaleza-CE, como meio de integração e socialização da tecnologia, entre estudantes, professores e pesquisadores;

Instalação da estação e sensores em diversas áreas do semiárido, incluindo reserva de caatinga de Aiuaba (Aiuaba-CE) , onde estações de diversos fabricantes já fazem o monitoramento para comparação dos resultados.

O pluviógrafo automático capacitivo apresentou convergência nos dados gerados em relação ao pluviômetro manual, quando foi submetido à precipitação de alta intensidade, e também eventos de baixa intensidade. Não obstante, faz-se necessária a observação do funcionamento do instrumento, com o intuito de verificar seu desempenho e comportamento, face à intempéries climáticas.

Instalar a estação e sensores no perímetro irrigado do Baixo-Acaraú, localizado na região norte do Estado do Ceará, com o intuito de dar suporte à agricultura de precisão do pequeno produtor dessa área irrigada.

BIBLIOGRAFIA

ALBUQUERQUE, A. W.; GILSON FILHO, M.; SANTOS, J. R.; COSTA, J. P. V.; SOUZA, J. L. **Determinação de fatores da equação universal de perda de solo em Sumé, PB. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 2, 153-160, 2005.

ALVES, N. N. LUCENA. **Caracterização de micro-bacia hidrográfica experimental no semiárido brasileiro como suporte a estudos de degradação**. 2008, dissertação de mestrado apresentada na Universidade Federal do Ceará. 75 p.

ALVES, N. N. L.; CANAFISTULA, F. J. F.; TEIXEIRA, A. S.; SANTOS, C. C.; ANDRADE, E. M.; **Development and Application of an Automatic Hydrological Station for Monitoring First and Second Order Watersheds**. Setembro de 2008. Foz do Iguaçu. Anais. CONBEA, 2008. 4 p.

ARAÚJO, J.C.; PIEDRA, J.I.G.; COSTA, A.C. **Densidade de Medições Pluviométricas e Planejamento de Recursos Hídricos: O caso da bacia experimental de Aiuba, Ceará**. IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Nov. 2008. Salvador-BA. 8 p.

BAUM, M.C.; DUKES, M.D.; HAMAN, D.Z. **Selection and use of water meters for irrigation water measurement**. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/ae106>>. Acesso em: 30 maio de 2011. 7 p.

BRAGA, S.M.; DELARIZZA, R.A.; SANTOS, I.; FERNANDES, C.V.S. **Avaliação de Performance de Pluviômetros de Bâscula: Técnicas para a Realização de Ensaios Pluviométricos em Laboratório**. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Nov. 2006- São Paulo-SP.

CAMARGO, A. P.; **Desenvolvimento de um Medidor de Vazão Utilizando Célula de Carga**. Piracicaba, 2009, dissertação de mestrado apresentada na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". 126 p.

CAMPBELL SCIENTIFIC INC. **Instruction Manual: Model HMP45C Temperature and Relative Humidity Probe.** 2009, 24 p.

CARVALHO, R.E.; SILVA, A.P.M.A. **Capacitor cilíndrico Excêntrico.** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 24, nº 3, setembro, 2002. p. 290 a 295.

CAMPBELL SCIENTIFIC INC. **Resource CD: Reference Materials & Starter Software.** Oct. 2010. Campbell Scientific, Inc. Logan, UT USA.

CAMPBELL SCIENTIFIC INC. **Operator's Manual: CR1000 Measurement and Control System.** 2013, 588 p.

CLARK, T. L.; MCCOLLUM, M. B.; TROUT, D. H.; JAVOR, K. **Marshall Space Flight Center Electromagnetic Compatibility Design and Interference Control (MEDIC) Handbook.** NASA Reference Publication 1368, 1995. 162 p.

CABRIT, A.; COLIN, F.; BAILLY, J. S.; AYROLES, H.; GARNIER, F. **Soft Water Level Sensor for Characterizing the Hydrological Behaviour of Agricultural Catchments.** Sensors 2011, nº 11, p. 4556-4673.

CRESESEB. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito.** Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php>

CRUZ, T. M. L., TEIXEIRA, A. S., CANAFISTULA, F. J. F., SANTOS, C. C., NASCIMENTO FILHO, K. L. N., MESQUITA, P. E. G. **Ensaio de um sensor capacitivo como medidor de nível de água.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 30., 2007, Bonito. Anais. CONBEA, 2007.

DAVIS INSTRUMENTS, **Wireless Temperature/Humidity Station Installation Manual.** Rev B Manual, 2009. 3465 Diablo Avenue, Hayward, CA 94545-2778 U.S.A. 12 p. Disponível em: http://www.davisnet.com/product_documents/weather/manuals/07395-242_IM_06382.pdf. Acessado em 25 novembro de 2012.

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. **LM317 – 3 – Terminal Positive Adjustable Regulator**. Data sheet. Março 2013, 7 p.

FAO. **Es necesario mejorar las prácticas agrícolas**. Março de 2007. Disponível em: https://www.fao.org.br/vernoticias.asp?id_noticia=46.

FISHER, D.K.; THOMSON, S.J.; SMIH, L.A.; BRAZIL, B.L. **Automated Data Collection Using Simple and Inexpensive Microcontrollers and Semiconductor Sensors**. ASAE Annual International Meeting. The Society for engineering in agricultural, food, and biological systems, July 2003. Las Vegas, Nevada, USA.

FUNCEME. **Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos**. Disponível em: <http://www.funceme.br/index.php/areas/tempo/chuvas-diarias-municipios>. Acessado 29 de julho de 2013.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**. Edgard Blücher Ltda.1988. 291 p.

JEVONS, J. C. **On the deficiency of rain an elevated rain-gauge, as caused by wind**. London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine, 22, 421-433. 1861.

JUCÁ, S.C.S.; CARVALHO, P.C.M.; BRITO, F.T. **A Low Cost Concept for Data Acquisition Systems Applied to Decentralized Renewable Energy Plants**. Sensor, nº 11, p 743-756. Disponível em: www.mdpi.com/journal/sensors. Acessado em: 1 junho de 2011.

KENNETT, D. J.; BREITENBACH, S. F. M.; AQUINO, V. V.; ASMEROM, Y.; AWE, J.; BALDINI, J. U. L.; BARTLEIN, P.; CULLETON, B. J.; EBERT, C.; JAZWA, C.; MACRI, M. J.; MARWAN, N.; POLYAK, V.; PRUFER, K. M.; RIDLEY, H. E.; SODEMANN, H.; WINTERHALDER, B.; HAUG, G. H. **Development and Disintegration of Maya Political Systems in Response to Climate Change**. Science **338**, 788 (2012). Disponível em: www.sciencemag.org. Acessado em: 14 Novembro, 2012.

KIM, L., NELSON, R. R. **Tecnologia, Aprendizado e Inovação: As experiências das Economias de Industrialização Recente**. Editora Unicamp. Vol I, 504 p. 2009.

KURTYKA J. C. 1953. **Precipitation measurement study**. Report of investigation No. 20, State Water Survey, Illinois, p. 178.

MEDEIROS, P.H.A. **Processos hidrossedimentológicos e conectividade em bacia semiárida: modelagem distribuída e validação em diferentes escalas**. Fortaleza 2009.

MEDEIROS, S. S. et al. **Sinopse do Censo Demográfico para o Semiárido Brasileiro**. Campina Grande-PE. INSA, 2012. 103 p. Disponível em: <http://www.insa.gov.br/censosab/publicacao/sinopse.pdf>. Acessado em: 20 de junho de 2012.

NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. Data sheet: **LM35/LM35A/LM35C/LM35CA/LM35D-Precision Centigrade Temperature Sensors**. 1994. 13 p.

OLIVEIRA, B. C.; CARDOSO, M. A. A.; OLIVEIRA, J. C.; OLIVEIRA, F. A.; CAVALCANTE. **Características produtivas do tomateiro submetido a diferentes níveis de sais, na água de irrigação**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, PB. V.11, n1, p. 11-16, 2006.

OLIVEIRA, G.; ARAÚJO, M. B.; RANGEL, T. F.; ALAGADOR, D.; DINIZ-FILHO, J. A. F. **Conserving the Brazilian semiarid (Caatinga) biome under climate change**. Biodivers Conserv (2012) 21: p. 2913-2926. Doi: 10.1007/s10531-012-0346-7.

PALÁCIO, H. A. Q. **Avaliação Emergética de Microbacias Hidrográficas do Semiárido Submetidas a Diferentes Manejos**. 2011. Tese de doutorado apresentada na Universidade Federal do Ceará.

PURCELL, E.M. **Curso de Física de Berkeley: Eletricidade e Magnetismo- volume 2.** São Paulo – Brasil. Editora Edgard Blücher Ltda. 1970. 424 p.

QUIJANO, P. M. G. **Hidrologia General Agrícola.** Biblioteca Agrícola Espanhola. Calpe – Madrid, 1922. 338 p.

RENDE, A.; BIAGE, M. **Characterization of capacitive sensors for measurements of the moisture in irrigated soils.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences. Rio de Janeiro, nº 3, vol.24, july 2002.

R. M. YOUNG COMPANY. **Precipitation Gage- Manual PN: 50202-90.** 2801 Aeropark Drive, Traverse City, Michigan 49686, USA.

R. M. YOUNG COMPANY. **Manual PN: 50202-90.** Traverse City, Michigan, USA/ February, 1996.

ROCHA NETO, O. C.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFISTULA, F. J. F.; SOUZA, F. N. P.; NUNES FILHO, J. L. N. **Utilização de uma Grade de Sensores para a Determinação de Bulbo Úmido.** XXXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Agosto de 2009. Juazeiro-BA/Petrolina-PE.

RODRIGUES, J. O. **O uso da terra e a resposta hidrossedimentológica em pequenas bacias hidrográficas semiáridas.** 2009, dissertação de mestrado apresentada na Universidade Federal do Ceará.

SANTANA, E. W. **Cenário Atual do Semiárido Cearense.** Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. Fortaleza: INESPE, agosto de 2011. 482 p.

SANTOS C. N. **Mensuração da Erosão do Solo no Semiárido em Diferentes Usos de Terras e Escalas Espaciais.** 2012, dissertação de mestrado apresentada na Universidade Federal do Ceará.

SEVRUK B.; KLEM S. **Types of standard precipitation gauges.** In WMO/IAHS/ETH Int. Workshop on Precipitation measurement, St Motitz, 3-7 December 1989.

STRANGWAYS, I. **A history of rain gauges.** Weather. V. 65, nº 5. May 2010.

STRANGWAYS, I. Precipitation – Theory, Measurement and Distribution. Cambridge University Press. V 01, p 290, 2007.

SENSIRION THE SENSOR COMPANY. Data sheet: **SHT1x/SHT7x Humidity & Temperature Sensor System.** Disponível em: www.sensirion.com. V2 march 2003. 9 p.

SILVA, I.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFISTULA, F. J. F.; LEÃO, R. A. O. **Development of a Capacitive Sensor for Monitoring Soil Moisture.** 2005 ASAE Annual International Meeting. ASAE Tampa Convention Center . Tampa, Flórida. July 2005.

XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. **Manejo de Irrigação.** SBEA. Poços de Caldas-MG, 1998. 368 p.

APÊNDICE 1 PUBLICAÇÕES ONDE FORAM USADOS DADOS OBTIDOS POR INTERMÉDIO DE INSTRUMENTAÇÃO DESENVOLVIDA NO PRESENTE TRABALHO

Artigos completos publicados em periódicos

SANTOS, J. C. N. ; PALÁCIO, H. A. Q. ; ANDRADE, E. M. ; MEIRELES, A. C. M. ; ARAÚJO NETO, J. R. . Runoff and soil and nutrient losses in semiarid uncultivated fields. Revista Ciência Agronômica (UFC. Impresso), v. 42, p. 813-820, 2011.

RODRIGUES, Joseilson de Oliveira ; ANDRADE, Eunice Maia de ; PALÁCIO, Helba Araújo de Queiroz ; MENDONCA, L. A. R. ; SANTOS, J. C. N. . Sediment loss in semiarid small watershed due to the land use. Revista Ciência Agronômica (UFC. Online), v. 44, p. 488-489, 2013.

ARAÚJO NETO, J. R. ; PALÁCIO, H. A. Q. ; ANDRADE, E. M. ; SANTOS, J. C. N. ; PINHEIRO, E. A. R. . OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE CURVA (CN-SCS) PARA DIFERENTES MANEJOS NA REGIÃO SEMIÁRIDA, CEARÁ, BRASIL. Irriga (UNESP. CD-ROM), v. Ed.Esp, p. 264-279, 2012.

PALÁCIO, H. A. Q. ; SILVA FILHO, J. A. ; ANDRADE, E. M. ; SANTOS, J. C. N. ; BRASIL, P. P. . Uso da terra e resposta hidrossedimentológica de microbacia no semiárido. Agro@mbiente On-line, v. 6, p. 187-194, 2012.

Trabalhos completos publicados em anais de congressos

SANTOS, J. C. N. ; ANDRADE, E. M. ; PALÁCIO, H. A. Q. ; ARAÚJO NETO, J. R. ; LIMA, C. A. . EFEITOS DA VEGETAÇÃO NA REDUÇÃO DAS PERDAS DE ÁGUA E SOLO EM MICROPARCELAS DE EROSIÃO. In: I Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido SBRNS, 2013, Iguatu. I SBRNS, 2013.

ANDRADE, E. M. ; ARAÚJO NETO, J. R. ; PALÁCIO, Helba Araújo de Queiroz ; RODRIGUES, Joseilson de Oliveira ; SANTOS, J. C. N. ESCOAMENTO SUPERFICIAL VERSUS MANEJO DA VEGETAÇÃO EM MICROBACIAS DO SEMIÁRIDO. In: I Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido SBRNS, 2013, Iguatu. I SBRNS. Fortaleza, 2013.

ARAÚJO NETO, J. R. ; ANDRADE, E. M. ; PALÁCIO, Helba Araújo de Queiroz ; SANTOS, J. C. N. ; BRASIL, P. P. . NÚMERO DE CURVA (CN-NRCS) VERSUS UMIDADE ANTECEDENTE COM COBERTURA VEGETAL MODIFICADA EM REGIÃO SEMIÁRIDA. In: I Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido SBRNS, 2013, Iguatu. I SBRNS. Fortaleza, 2013.

BRASIL, P. P. ; ARAÚJO NETO, J. R. ; PALÁCIO, Helba Araújo de Queiroz ; ANDRADE, E. M. ; SANTOS, J. C. N. . MANEJO NO SOLO E A PREDIÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM UMA MICROBACIA EXPERIMENTAL. In: I Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido SBRNS, 2013, Iguatu. I SBRNS. Fortaleza, 2013.

SANTOS, J. C. N. ; ANDRADE, E. M. ; MEDEIROS, P. H. A. ; PALÁCIO, H. A. Q. ; ARAÚJO NETO, J. R. . COMPORTAMENTO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO EM DIFERENTES ESCALAS ESPACIAIS EM MICROBACIA SUBMETIDA ÀS MUDANÇAS DE USO DO SOLO NO SEMIÁRIDO. In: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2012, Foz do iguaçu. ENES, 2012.

SILVA FILHO, J. A. ; ANDRADE, E. M. ; PALÁCIO, H. A. Q. ; SANTOS, J. C. N. ; IZIDIO, N. S. C. . INFLUÊNCIA ANTRÓPICA SOBRE A PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA DE ECOAMENTO EFÊMERO NO SEMIÁRIDO. In: III Workshop Internacional Sobre Planejamento e Desenvolvimento Sustentável em Bacias Hidrográficas, 2011, Fortaleza. III Workshop Internacional Sobre Planejamento e Desenvolvimento Sustentável em Bacias Hidrográficas, 2011.

PALÁCIO, H. A. Q. ; ANDRADE, E. M. ; SANTOS, J. C. N. ; LIMA, C. A. ; Batista, A. A. ; IZIDIO, N. S. C. . PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA NO SEMIÁRIDO COM DIFERENTES USOS DO SOLO. In: 13º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2011, São Paulo. CBGEA, 2011.

SANTOS, J. C. N. ; ANDRADE, E. M. ; PALÁCIO, H. A. Q. ; ARAÚJO NETO, J. R. ; LIMA, C. A. ; SILVA FILHO, J. A. . USO DO SOLO E O PROCESSO EROSIVO EM ESCALAS ESPACIAIS DISTINTAS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. In: 13º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2011, São Paulo. CBGEA, 2011.

SANTOS, J. C. N. ; PALÁCIO, H. A. Q. ; Alves, N. N. L. ; ANDRADE, E. M. ; ARAÚJO NETO, J. R. . VAZÃO DE PICO EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA DE ESCOAMENTO EFÊMERO EM IGUATU-CE. In: IX ENPPG, IX ENICIT, III SIMPIT, 2009, Fortaleza-CE. IX ENPPG, IX ENICIT, III SIMPIT, 2009.

Resumos expandidos publicados em anais de congressos

ARAÚJO NETO, J. R. ; Pinheiro, E. A. R. ; Lopes, J. W. B. ; ANDRADE, E. M. ; SANTOS, J. C. N. . ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO MODELO SCS PARA UMA MICROBACIA UTILIZANDO OS MÉTODOS DE MONTE CARLO E LHS. In: I INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING e IV WINOTEC, 2012, Fortaleza. IV WINOTEC, 2012.

ARAÚJO NETO, J. R. ; ANDRADE, E. M. ; SANTOS, J. C. N. ; PINHEIRO, E. A. R. ; PALÁCIO, H. A. Q. . CALIBRAÇÃO DO NÚMERO DE CURVA (CN-SCS) PARA DIFERENTES MANEJOS DA CAATINGA NA REGIÃO SEMIÁRIDA DO CEARÁ. In: I INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING e IV WINOTEC, 2012, Fortaleza. IV WINOTEC, 2012.

SANTOS, J. C. N. ; ANDRADE, E. M. ; PALÁCIO, H. A. Q. ; ARAÚJO NETO, J. R. ; SILVA FILHO, J. A. . Measurement of soil erosion on different spatial scales with vegetation cover of caatinga in the northeast of Brazil. In: 21st Century Watershed

Technology Conference and Workshop, 2012, Bari. 21st Century Watershed Technology Conference and Workshop, 2012.

SILVA, L. A. ; VASCONCELOS, H. S. ; TEIXEIRA, Adunias S ; CRUZ, Tadeu Macryne Lima ; CANAFISTULA, Francisco José Firmino . MEDIÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DA TEMPERATURA E M SENSORES CAPACITIVOS DE NÍVEL. In: XLII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - CONBEA, 2013, Fortaleza. ANAIS DO XLII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. Jaboticabal: SBEA, 2013. v. 1. p. 1-7.

PALÁCIO, H. A. Q. ; ANDRADE, E. M. ; SANTOS, J. C. N. ; ARAÚJO NETO, J. R. ; BRASIL, P. P. . Emery evaluation of semi-arid watersheds under different management strategies. In: 21st Century Watershed Technology Conference and Workshop, 2012, Bari. 21st Century Watershed Technology Conference and Workshop, 2012.

ANDRADE, E. M. ; PALÁCIO, H. A. Q. ; SANTOS, J. C. N. ; Guerreiro, M. J. S. ; RODRIGUES, J. O. . Runoff curve number for a small forested watershed in a semiarid region of Brazil. In: 21st Century Watershed Technology Conference and Workshop, 2012, Bari. 21st Century Watershed Technology Conference and Workshop, 2012.

BRASIL, P. P. ; PALÁCIO, H. A. Q. ; ANDRADE, E. M. ; SANTOS, J. C. N. ; ARAÚJO NETO, J. R. . ESTIMATIVA DO FATOR CP DA RUSLE EM UMA MICROBACIA DE VEGETAÇÃO NATIVA NO BIOMA CAATINGA. In: VII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação - VII CONNEPI, 2012, Palmas. VII CONNEPI, 2012.

SILVA FILHO, J. A. ; PALÁCIO, H. A. Q. ; ANDRADE, E. M. ; SANTOS, J. C. N. ; Ricarte, S. F. . AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM DIFERENTES MANEJOS EM MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS DO SEMIÁRIDO. In: X Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica, 2011, Maracanaú. X ENICIT, 2011.

Rodrigue, R. N. ; PALÁCIO, H. A. Q. ; ANDRADE, E. M. ; SANTOS, J. C. N. ; SILVA FILHO, J. A. . MONITORAMENTO DA VAZÃO DE PICO EM UMA MICROBACIA HIDROGRÁFICA DO SEMIÁRIDO. In: VI Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica - CONNEPI, 2011, Natal. CONNEPI, 2011.

SANTOS, J. C. N. ; PALÁCIO, H. A. Q. ; MEIRELES, A. C. M. ; ANDRADE, E. M. ; ARAÚJO NETO, J. R. . Avaliação das perdas de água e solo em uma microbacia com cobertura herbácea rala no semi-árido Cearense. In: III Workshop internacional de inovações tecnológicas na irrigação & II Conferência sobre recursos hídricos do semiárido, 2010, Fortaleza. WINOTEC, 2010.

SANTOS, J. C. N. ; PALÁCIO, H. A. Q. ; MEIRELES, A. C. M. ; ANDRADE, E. M. ; ARAÚJO NETO, J. R. . Perdas de solo e água em microbacia com cobertura herbácea rala no semi-árido cearense. In: XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2009, Fortaleza. XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2009.

RODRIGUES, J. O. ; ANDRADE, E. M. ; PALÁCIO, H. A. Q. ; SANTOS, J. C. N. ; ARAÚJO NETO, J. R. . INFLUÊNCIA DA AÇÃO ANTRÓPICA SOBRE A PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS DE ECOAMENTO EFÊMERO NO SEMI-ÁRIDO NORDESTINO. In: XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2009, Fortaleza. XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2009.

LOBATO, F. A. O. ; ANDRADE, E. M. ; MEIRELES, A. C. M. ; SANTOS, J. C. N. ; LOPES, J. F. B. . Perdas de solo por erosão hídrica para diferentes alturas pluviométricas em área de Caatinga cearense. In: XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2009, Fortaleza. XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2009.

ODILIO, ; TEIXEIRA, Adunias S ; CANAFISTULA, Francisco José Firmino ; NATANAEL, ; NASCIMENTO FILHO, K.L.N. ; NUNES FILHO, J. L. N. . UTILIZAÇÃO DE UMA GRADE DE SENSORES PARA A DETERMINAÇÃO DE BULBO ÚMIDO. In: XXXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2009, Juazeiro-BA/Petrolina-PE. ANAIS XXXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2009. v. I.

ALVES, N. N. L.; CANAFISTULA, F. J. F.; TEIXEIRA, A. S.; SANTOS, C. C.; ANDRADE, E. M.; Development and Application of na Automatic Hydrological Station for Monitoring First and Second Order Watersheds. Setembro de 2008. Foz do Iguaçu. Anais. CONBEA, 2008. 4 p.

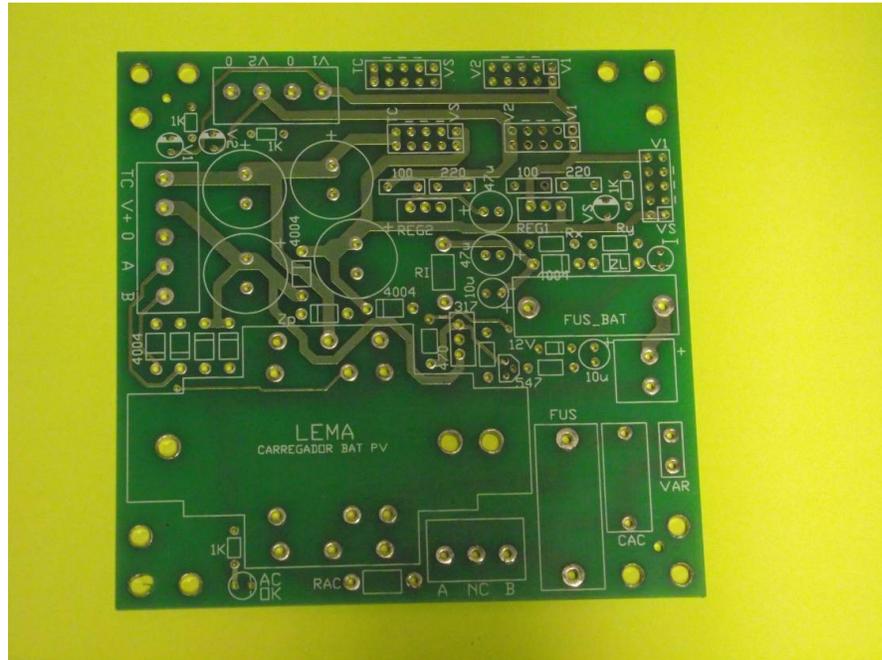
Artigos aceitos para publicação

PALÁCIO, Helba Araújo de Queiroz ; ANDRADE, E. M. ; SANTOS, J. C. N. ; ARAÚJO NETO, J. R. ; BRASIL, P. P. . EMERGY EVALUATION OF SEMI-ARID WATERSHEDS UNDER DIFFERENT MANAGEMENT STRATEGIES. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Transactions, 2013.

Santos, J.C.N. ; Andrade, E.M. ; Palácio, H.A.Q. ; Medeiros, P.H.A. ; Araújo Neto, J. . (ARTIGO SUBMETIDO) Land use and the hydrological and sedimentological process on different spatial scales in a semiarid watershed. Earth Surface Processes and Landforms, 2013.

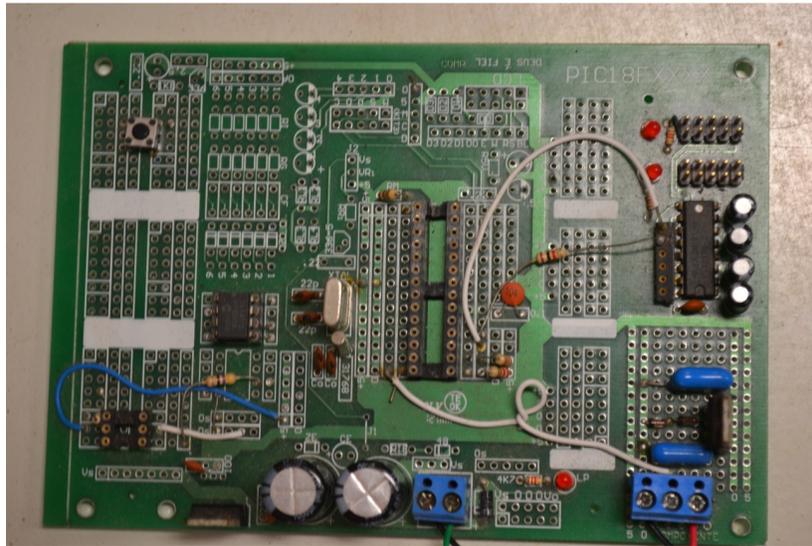
APÊNDICE 2 – PCB'S

Figura 66 - Protótipo da placa de circuito impresso do carregador de bateria para painel fotovoltaico



Fonte: Autor

Figura 67 – Montagem do SAD e PCI multifuncional e com furos metalizados



Fonte: Autor